

El lenguaje y la vida de los elementos químicos: inteligencia artificial y comunicación gráfica

Àngela Amorós Aparicio, Elisava Barcelona School of Design and Engineering (UVic-UCC), Spain, aamorosa@elisava.net <https://orcid.org/0009-0005-1862-2355>; Javier Peña Andrés, Elisava Barcelona School of Design and Engineering (UVic-UCC), Spain, jpenya@elisava.net <https://orcid.org/0000-0003-0932-9737> //Recepción: 30/05/2025, Aceptación: 31/07/2025, Publicación: 15/11/2025

Resumen

La inteligencia artificial, combinada con la comunicación gráfica, ofrece nuevas posibilidades para representar el lenguaje de los elementos químicos en la educación primaria. Esta aproximación visual y tecnológica no solo facilita la comprensión del universo químico, sino que potencia competencias STEM clave en edades tempranas. Equiparar los símbolos químicos al lenguaje alfanumérico mediante IA permite generar representaciones accesibles, creativas y significativas para los estudiantes, fomentando una alfabetización científica más temprana y contextualizada.

Palabras clave

Inteligencia artificial; elementos químicos; comunicación gráfica; educación primaria; STEAM

The language and life of chemical elements: artificial intelligence and graphic communication

Abstract

Artificial intelligence, combined with graphic communication, offers new possibilities for representing the language of chemical elements in primary education. This visual and technological approach not only facilitates the understanding of the chemical universe, but also enhances key STEM competencies at early ages. Equating chemical symbols with alphanumeric language through AI allows for the creation of accessible, creative, and meaningful representations for students, fostering earlier and more contextualized scientific literacy.

Keywords

Artificial intelligence; chemical elements; graphic communication; primary education; STEAM

Introducción

En un escenario global marcado por la aceleración científica, la transformación digital y la necesidad de competencias adaptativas, surge la urgencia de replantear cómo se enseña la ciencia desde edades tempranas. En este contexto, el lenguaje simbólico de los elementos químicos, tradicionalmente restringido al ámbito técnico, se revela como una poderosa herramienta educativa cuando se explora desde una comunicación gráfica innovadora. Esta investigación propone integrar dicho lenguaje con metodologías visuales y tecnologías emergentes como la inteligencia artificial, con el fin de fortalecer las competencias STEM en la educación primaria.

Más allá de representar conceptos químicos, este enfoque busca desarrollar habilidades transversales como el pensamiento abstracto, la creatividad y la alfabetización científica. En sintonía con las recomendaciones de organismos internacionales como la UNESCO y la OCDE, se pretende responder a los desafíos educativos del siglo XXI mediante experiencias de aprendizaje que fomenten la curiosidad, la resolución de problemas y la conexión entre ciencia, arte y tecnología. Así, la representación gráfica de los elementos químicos no solo comunica conocimiento, sino que lo transforma en una experiencia significativa y accesible para las nuevas generaciones.

Ante este paradigma, es comprensible la demanda creciente de profesionales con perfiles STEM que puedan afrontar los desafíos más complejos y urgentes tales como la contaminación, la falta de recursos energéticos, la ciberseguridad, la dependencia tecnológica de las sociedades del siglo XXI o la brecha existente al acceso de dichos recursos. De acuerdo con un informe universitario de Harvard (O'Rourke, 2021), los empleos STEM han crecido un 79% en las tres últimas décadas y se prevé que los puestos de trabajo en estas áreas científicas incrementen un 11% más del 2020 al 2030. A pesar de esta necesidad, en la actualidad se observa una creciente desmotivación de los estudiantes hacia las asignaturas científico-tecnológicas, a menudo consideradas abstractas o complejas, hecho que repercute en la elección posterior de estudios superiores, de perfiles laborales y profesiones como la ingeniería informática, la química o la investigación en áreas como la física teórica o las matemáticas aplicadas. En esta línea, encontramos estudios (Ministerio de Educación, Formación Profesional y Deportes, 2023; fundación CYD, 2023) recientes a nivel nacional que muestran un bajo rendimiento en la educación de los jóvenes españoles en materias científicas

y un porcentaje escaso de profesionales que se forman en estos saberes. En primer lugar, los resultados del informe PISA (Program for International Student Assessment, cuya prueba examinó el progreso académico de alumnos de 15 años en el 2022 en múltiples países a nivel mundial) muestran un rendimiento por debajo de la media europea en las áreas de matemáticas y ciencias, hecho que evidencia dificultades en la adquisición de estos saberes en un número significativo de comunidades autónomas y en las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla. En segundo lugar, los resultados del informe CYD (Fundación de Conocimiento y Desarrollo, cuyo estudio analizó la salida al mercado laboral de los titulados universitarios españoles y su inserción laboral en el 2023) revelan que el porcentaje de titulados españoles en áreas STEM (18,8%) se encuentra por debajo de la media europea (25,1%), siendo España el cuarto país con menor número de licenciados en el ámbito STEM.

Para este estudio se ha decidido abordar el problema anteriormente mencionado a partir de escoger un área específica de conocimiento de la amplia variedad de disciplinas científicas y tecnológicas que se incluyen en el enfoque STEM: la química. Su elección se debe a que encontramos varios autores (Bălan et al., 2025; Farmer & Prather, 2020; Ravishankara et al., 2015; von Schneidemeser et al., 2015; Wilcox et al., 2017) que vinculan intrínsecamente los desafíos ambientales, energéticos y de salud pública de carácter global con la química, cuya disciplina se incluye en el acrónimo STEM. Asimismo, las cuestiones más urgentes hoy en día como el cambio climático, la seguridad alimentaria, la producción energética, el desarrollo de medicamentos o la gestión de residuos están directamente relacionadas con los elementos de la tabla periódica, debido a que todos los compuestos químicos causantes de estas situaciones están formados por elementos químicos. De este modo, por ejemplo, los Gases de Efecto Invernadero (GEI) están formados por carbono (C), oxígeno (O), hidrógeno (H) y nitrógeno (N), los cuales son los causantes del calentamiento global; los metales pesados, compuestos por elementos como el plomo (Pb), el cadmio (Cd) o el mercurio (Hg), son altamente tóxicos para los ecosistemas y la salud humana y los pesticidas, herbicidas y fertilizantes son productos formados por nitrógeno (N), cloro (Cl), fósforo (P) y potasio (K), causantes de la contaminación del agua y de los suelos.

Así, en cada símbolo de elemento químico se encuentra información relevante relacionada con el entorno en el que vivimos y con el que interaccionamos a diario, del mismo modo que a

una letra de un alfabeto se le asocia una unidad de información en forma de fonema. Por ende, y entendiendo el lenguaje como cualquier sistema estructurado de signos (escritos, orales, gestuales, matemáticos o simbólicos) que permite comunicar información, encontramos autores (Farré et al., 2014; Lorenzo, 2021; Quílez-Pardo, 2016; Valdés-González & Martín-Antón, 2023) que perciben los elementos químicos y su simbología como un lenguaje universal, estructurado y comparable al que nos ofrecen las lenguas naturales o el lenguaje matemático impartidos en la educación básica. Sin embargo, su introducción en el ámbito escolar para entender y comunicar el entorno y los materiales que nos rodean no se hace hasta los 13-15 años (en función del centro educativo, debido a la adaptabilidad curricular que ofrece la LOMLOE, la ley educativa vigente). Este hecho dista mucho de lo que sucede con el lenguaje alfanumérico, el cual se empieza a introducir a los 3-4 años. Varios estudios académicos (Chowdhury, 2022; Mokiwa, 2017; Rees et al., 2019; Talanquer, 2022) sugieren que la enseñanza tardía del lenguaje de los elementos químicos se debe a su simbología específica, su alta carga conceptual y su naturaleza no observable, hecho que lo hace más complejo y abstracto en comparación con otros lenguajes. A las dificultades comentadas anteriormente, autores como Franco-Mariscal y Olivia-Martínez (2013) argumentan que a este obstáculo se le añade la falta de interés e incompreensión de los alumnos hacia saberes como la tabla periódica, los cuales se enseñan a menudo alejados de la realidad cotidiana del estudiante y son presentados de forma teórica o excesivamente técnica. Asimismo, autores como Martí-Centelles y Rubio-Magnieto (2014) añaden que habitualmente los saberes de las áreas STEM como la química son vistos como tediosos, mecánicos y poco atractivos de aprender, especialmente para los más pequeños.

Para poder revertir esta tendencia, encontramos en la comunicación gráfica una herramienta poderosa para facilitar la comprensión de saberes como los elementos químicos o la tabla periódica, haciéndolos más entendibles, cercanos y significativos para los alumnos. El proceso de transmitir la información mediante elementos visuales como imágenes, colores o símbolos permite comunicar de manera más clara y efectiva, haciendo visible lo abstracto y acercando los conocimientos más complejos al alumnado para que sean más comprensibles. En base a lo dicho y a partir de la herramienta de la comunicación gráfica se vislumbra que se pretende aumentar el interés en disciplinas STEAM y, además, con la inclusión del arte en el

acrónimo, los saberes científicos y tecnológicos se convierten en más accesibles y divertidos para el alumnado. Desde esta perspectiva, encontramos autores (Bequette & Bequette, 2012; Herro & Quigley, 2017; Quigley et al., 2017; Tuveri et al., 2024; Yakman, 2008) que respaldan la idea de que el enfoque STEAM permite conectar las áreas más científicas con habilidades creativas, fundamentales tanto en la educación como en profesiones científicas y tecnológicas. Con STEAM se consigue, a su vez, una aproximación más experiencial que permite al alumnado reducir su aversión hacia estas disciplinas, las cuales se suelen considerar como demasiado técnicas o difíciles. Además, al facilitar el entendimiento de conceptos abstractos, la comunicación gráfica consigue traducir lo complejo a un lenguaje más accesible, hecho que permite la introducción exitosa de saberes como la tabla periódica o los elementos químicos en edades más tempranas, previas a la educación secundaria.

Desarrollo

Perspectiva teórica. Edad mínima de introducción de saberes relacionados con el lenguaje de los elementos químicos en la educación primaria con la ayuda de material de apoyo visual, físico y digital.

En la educación primaria (6-12 años), la ley actual LOMLOE (Ministerio de Educación, Formación Profesional y Deportes, 2020) define un marco para el currículo educativo en España en el que se incluyen saberes propios del área de Conocimiento del Medio Natural, Social y Cultural relacionados con la introducción del concepto materia, sus propiedades, cambios químicos y físicos. Estos contenidos ofrecen una breve introducción y nociones básicas de química, a pesar de que se presenten como Ciencias de la Naturaleza en estas edades. Aunque los elementos químicos no estén contemplados explícitamente en estas etapas educativas, la ley vigente ofrece flexibilidad en el currículo, dando la oportunidad al docente de introducir saberes que no están contemplados en la asignatura si complementan los contenidos básicos establecidos y contribuyen en el desarrollo competencial de los alumnos. A continuación, se presentan varios autores y psicólogos que defienden la introducción temprana de los saberes referentes a la tabla periódica y los elementos químicos a partir de una adaptación de dichos contenidos y de un enfoque acorde a su edad, debido a los beneficios que aportan al alumnado tales como la estimulación de la curiosidad, la alfabetización científica o la conexión entre los elementos y su vida diaria.

A la hora de determinar la edad mínima para introducir estos saberes debemos considerar que, desde un punto de vista cognitivo, psicólogos y autores como Piaget (2005), O'Dell (2016), Ruesta Quiroz y Gejaño Ramos (2022) concuerdan en que los alumnos de entre 6 y 12 años todavía presentan ciertas dificultades para entender conceptos e ideas abstractas hasta que alcanzan la etapa operativa formal, la cual se consolida en el primer ciclo de la educación secundaria. Sin embargo, los autores anteriores añaden que en la etapa preoperacional (la cual comprende de los 2 a los 7 años) los alumnos empiezan a desarrollar el pensamiento simbólico (capacidad de representar ideas mediante símbolos) y a utilizar la lógica en situaciones concretas. Así, en la siguiente etapa de su desarrollo cognitivo (etapa de las operaciones concretas, de los 7 a los 12 años) se inicia el pensamiento lógico basado en objetos reales, por lo que los alumnos pueden empezar a razonar siempre y cuando dispongan de objetos o imágenes que puedan ver, tocar o manipular durante su proceso de aprendizaje. El uso de materiales visuales y físicos es, por lo tanto, esencial, incluso en alumnos que están acabando la educación primaria y ya están empezando a consolidar un pensamiento más abstracto y formal. Esta necesidad de complementar los saberes con contenido visual y manipulable en edades tempranas es también defendida por el enfoque Montessori (Alasa & Lillard, 2023; Laski & Wang, 2023), el cual sostiene que es necesaria la manipulación activa de materiales y recursos gráficos y tangibles para que los alumnos tengan experiencias sensoriales, reales y concretas y, así, se produzca el aprendizaje significativo en los primeros años de la educación básica.

Conocer con detalle el grado de desarrollo cognitivo en base a la edad de los alumnos nos abre la puerta a introducir conceptos abstractos como los elementos químicos en la educación primaria a pesar de que aún no se haya desarrollado el pensamiento abstracto, siempre y cuando los saberes estén debidamente simplificados (por ejemplo, introduciendo solo algunos elementos de la tabla periódica previamente seleccionados por su relevancia y presencia en el día a día como el oxígeno, el carbono o el hidrógeno) y representados visualmente a partir de colores, personajes, símbolos o infografías según el ciclo en el que se encuentre el grupo clase. En esta línea, son varios los autores que, en la última década, han hecho publicaciones académicas en las que reflejan su posicionamiento hacia la introducción de los elementos de la tabla periódica en la educación primaria (6 a 12 años), en un período en el cual

el currículo educativo español no contempla la enseñanza de estos saberes. En sus propuestas didácticas reflejan que la incorporación de estos contenidos acompañados de la comunicación gráfica adecuada puede aportar beneficios a los alumnos de estas edades entorno a la motivación, el interés y la adquisición de competencias. Entre ellos, encontramos autores (Cámara Olim et al., 2024; Zamudio et al., 2024) que ven incrementada en sus alumnos la confianza, la satisfacción y la motivación intrínseca hacia los elementos de la tabla periódica cuando se presentan por medio de recursos visuales y lúdicos. En sus estudios se puede apreciar un incremento de la curiosidad hacia el diseño de los juegos y los personajes, cuya estética y gráficos llama la atención de los alumnos, mejorando así su actitud, predisposición e interés hacia estos saberes. Del mismo modo, Horikoshi (2021), Limpanuparb, (2024) y Montejo Bernardo y Fernández González (2021) afirman en sus estudios que, a partir de material visual tangible y manipulable (como por ejemplo tarjetas, tableros de juego, cartas o bloques de LEGO), se puede conseguir que los alumnos de estas edades empiecen a familiarizarse con algunos grupos de elementos y a retener los primeros saberes en torno a la tabla periódica, consiguiendo una primera aproximación divertida, ágil e inclusiva que dinamiza la clase y les anima a participar de manera activa en la dinámica de aula. Así, los autores anteriores buscan ofrecer a estos niveles de la educación básica un primer acercamiento desde una perspectiva atractiva que despierte su vocación científica. A estos múltiples beneficios, De Alencar et al. (2018) añade que, a partir de introducir la tabla periódica por medio de dinámicas grupales, los alumnos de estas edades empiezan a entender la posición de algunos elementos por medio del aprendizaje cooperativo mientras que, a su vez, mejoran su interacción entre ellos y con el profesor que dinamiza la actividad.

Si bien los autores anteriores ven la enseñanza de los elementos químicos en la niñez intermedia (de los 6 a los 12 años) como una propuesta pedagógicamente efectiva y alentadora, no fijan una edad exacta para la incorporación de dichos saberes. En sus artículos académicos exponen que, a partir de definir el grado de dificultad de los contenidos, la comunicación gráfica que proponen en sus propuestas didácticas tiene la capacidad de adaptarse a los distintos niveles y ciclos de la educación primaria. Sin embargo, encontramos estudios (Aygün & Abaci, 2014; Cass et al., 2021; Michailidis et al., 2020; Sánchez Borrero & Bravo Castañeda, 2024) que recomiendan adaptar tam-

bién el estilo de los elementos gráficos (menor grado de detalle, claridad de las formas y colores vibrantes), de la composición (texto e ilustración equilibrados -sin que las representaciones gráficas sean demasiado dominantes- con una tipografía *sans serif* de 14-16 puntos) y del formato (preferiblemente lúdico-tangible) de la comunicación gráfica si se conoce la edad del público objetivo, debido a que los alumnos del primer ciclo de primaria (por debajo de los 8 años) están, aún, al final de la etapa pre operacional de su desarrollo cognitivo, por lo que puede resultarles más difícil alcanzar un aprendizaje significativo con el mismo material didáctico de apoyo.

Perspectiva experimental. Acercamiento de los elementos químicos al alumnado por medio de la ilustración y la inteligencia artificial

La comunicación gráfica encontrada para la transmisión de conocimiento sobre los elementos químicos en estas edades (6-12 años) se puede analizar desde un enfoque pedagógico, un enfoque semiótico y un enfoque didáctico. Para este estudio, se ha escogido uno de los elementos más relevantes en la tabla periódica, el carbono, por su relevancia en la formación de las moléculas de la vida y su presencia en el entorno diario de los alumnos (por ejemplo, en forma de grafito en los lápices). Para poder evaluar la manera en la que estos contenidos se representan gráficamente a lo largo de la educación primaria, se han recopilado libros y otros materiales didácticos en los últimos 15 años (2010-2024) enfocados en la transmisión de saberes relacionados con la tabla periódica en estas edades (ver figuras 1 y 2). Las representaciones visuales seleccionadas por cumplir los criterios de este ensayo (comunicación gráfica relacionada con la tabla periódica, enfocada en un público K-6 -6 a 12 años- y publicada entre enero de 2010 y diciembre de 2024) se han analizado desde un punto de vista visual, didáctico y comunicativo. Se ha tenido en cuenta, también, el papel que juega la inteligencia artificial en el marco de la comunicación gráfica didáctica, para entender sus posibilidades en este contexto y a partir de qué edades puede suponer una herramienta beneficiosa para el aprendizaje en la educación básica.

Enfoque didáctico. La comunicación gráfica relativa a los elementos químicos en la educación primaria se ha encontrado, principalmente, en juegos de cartas, novelas ilustradas, aplicaciones para móviles y material de apoyo para las aulas (como láminas o pósters). Las representaciones visuales en formatos de tipo lúdico y tangible están más







| Comunicación gráfica del Carbono en educación primaria | | | | | | | | | | |
|---|------------------|-----------------------------------|---|-------------------------------------|------|--|------|---|-------------------|-----------------------|
| Imagen gráfica | Nombre | Aspecto | Recurso | Formato | Edad | Nombre del material | Año | Autor/es | Uso de tecnología | Grado de abstracción |
|  | Planta | Personaje (Cartoon) | Simbología (Fotosíntesis) | Juego de cartas (2 jugadores) | +6 | Elemental Duel | 2023 | Javier Martínez | No | Bajo |
|  | Lápiz | Objeto (Infografía) | Representación figurativa | Juego de adivinar (3-4 jugadores) | +6 | Dime qué elemento soy | 2020 | Agustina Bongioanni y Antonella Dan Córdoba | No | Bajo |
|  | Carbo (Monstruo) | Personaje fantástico (Cartoon) | Representación creativa y pedagógica (Verde-vida, fotosíntesis) | Póster, juego de cartas y app de AR | +8 | Elmonsters | 2020 | Andreas Dihm | Si | Bajo |
|  | Pájaro | Animal (Iconografía) | Simbología (Base de las moléculas de la vida) | Recurso visual para el aula | +8 | The Periodic Table of Elements, in Pictures | 2016 | Keith Enevoldsen | No | Bajo |
|  | Carbono | Parte del cuerpo humano (Cartoon) | Simbología (Base de las moléculas de la vida) | Juego de cartas (2-4 jugadores) | +8 | Atomic Bond | 2020 | Pablo Ortega | No | Bajo |
|  | Carbono | Letra | Simbología (Átomo) | Juego de cartas (2-4 jugadores) | +8 | Covalence: el juego de construcción de moléculas | 2016 | John J. Coveyou | No | Alto (Modelo atómico) |

Figura 1. Tabla comparativa sobre la comunicación gráfica dedicada a la enseñanza del carbono en la educación primaria, de los 6 a los 8 años; material propio.







| Comunicación gráfica del Carbono en educación primaria | | | | | | | | | | |
|---|----------------|--|---|-------------------------------------|--|--|----------------|-------------------------------|-------------------|--------------------------|
| Imagen gráfica | Nombre | Aspecto | Recurso | Formato | Edad | Nombre del material | Año | Autor/es | Uso de tecnología | Grado de abstracción |
|  | Carbono | Átomo antropomorfo (Modelo 3D) | Esquema de color CPK (Carbono-gris) | Juego de AR (para móvil) | +9 | Interactive experiences of AR | 2024 | Sandra Cámara Olim et al. | Si | Alto (Representación AR) |
|  | Carbono | Personaje con átomo de carbono (Cartoon) | Esquema de color CPK (Carbono-gris) | Juego de cartas (2-6 jugadores) | +10 | Synthesis | 2021 | Jordi Gomis et al. | No | Medio (Modelo atómico) |
|  | Carbo | Personaje antropomorfo (Cartoon) | Simbología (Base de las moléculas de la vida) | Novela corta | +10 | Elementos Elementos 2 Elementos 3 | 2018 2019 2021 | Javier Peña | No | Medio (Simbologías) |
|  | Carbon | Personaje antropomorfo (Flat/vector) | Representación figurativa (Libro y simbología (Átomo) | Libro informativo | +10 | The extraordinary Elements: The Periodic Table Personified | 2020 | Colin Stuart | No | Bajo |
|  | Carbono | Personaje antropomorfo (Cómics) | Simbología (Hombre - moléculas vida, lápiz - aplicación) | Cómic | +10 | La Tabla Periódica. Un cómic con mucha química | 2023 | Raquel Gu y Adela Muñoz | No | Bajo |
|  | Carbono | Personaje antropomorfo (Cómics) | Simbología (Átomos del Carbono) | Recurso visual para el aula, cartas | +10 | The Elements Personified | 2011 | Kaycie Dugas | No | Medio (Simbologías) |
|  | Carbono | Persona (Imagen IA) | Esquema de color CPK y simbología (Átomos del Carbono) | Novela corta | +10 | Elementos 6 | 2024 | The Clueless AI y Javier Peña | No | Medio (Simbologías) |
|  | Carbon | Personaje ninja (Cómics) | Simbología (Flexibilidad personal - flexibilidad carbono para formar enlaces) | Juego de cartas (2-4 jugadores) | +10 | Valence Plus | 2017 | Nathan Schreiber | No | Bajo |
|  | Diamante | Objeto (Imagen IA) | Representación figurativa | Juego de cartas | 18-25, también probado con niños (+11) | Chemical Element Lotto | 2024 | José Omar Zamudio et al. | No | Bajo |
|  | Rosalía Carbón | Personaje de Marvel (Cómics) | Regla Mnemotécnica | Recurso visual para el aula | +11 | Marvel Periodic Table | 2020 | Manuel Souto | No | Bajo/medio |

Figura 2. Tabla comparativa sobre la comunicación gráfica dedicada a la enseñanza del carbono (C) en la educación primaria, de los 9 a los 11 años; material propio.

presentes en los primeros años de la educación primaria (6 a 8 años), debido a la necesidad que presenta el público de estas edades de interactuar y manipular objetos y materiales didácticos para que se produzca el aprendizaje significativo. El contenido relativo a la tabla periódica, además, se sintetiza, de modo que se seleccionan un número determinado de elementos (que suele oscilar entre 5 y 20 de los 118 elementos que se conocen actualmente) para reducir la complejidad del contenido. Los criterios de selección de estos elementos suelen ser en base a su presencia en el entorno cotidiano y en la vida, aunque pueden variar en función del autor. Así, encontramos autores como Peña (2018, 2019, 2021) que escogen el carbono (C), el hidrógeno (H), el silicio (Si), el oxígeno (O) y el hierro (Fe), mientras que otros como Cámara Olim et al. (2024) y Coveyou (2016) eligen el nitrógeno (N), el carbono (C), el cloro (Cl), el hidrógeno (H) y el oxígeno (O). En el caso de Elemental Duel (Martínez, 2023), aunque el juego no está basado originalmente en los elementos químicos, se puede relacionar directamente con ellos debido a la estructura del juego, por lo que sus personajes sugieren el magnesio (Mg), el hidrógeno (H), el oxígeno (O), el carbono (C), el helio (He) y el azufre (S). Asimismo, otros autores como Bongioanni y Dan Córdoba (2020) o Gomis et al. (2021) deciden incluir, a los elementos anteriormente mencionados, un número mayor de elementos químicos en sus juegos educativos. A partir de mediados del segundo ciclo de primaria (9 a 12 años), la comunicación gráfica aparece en otros tipos de formato (Cámara Olim et al., 2024; Peña, 2024; Zamudio et al., 2024) que combinan la narrativa y las herramientas digitales, como las novelas cortas de ciencia ficción o las aplicaciones de móvil que ofrecen realidad aumentada. La incorporación de estos recursos en el aula permite situar los saberes en contextos más amplios, complejos y reales, para conectar los contenidos con historias y experiencias cercanas a los alumnos.

Enfoque semiótico. La representación gráfica de los elementos químicos y, en este caso en particular, del carbono, varía significativamente en función de la edad específica del público K-6. En el primer ciclo de la educación primaria (6 a 8 años) las imágenes que encontramos en la figura 1 (Bongioanni & Dan Córdoba, 2020; Dihm, 2020; Enevoldsen, 2016; Martínez, 2023; Ortega, 2020) tienden a ser ilustraciones infantiles, sencillas y simpáticas de plantas, monstruos u otras criaturas, cuyos colores son especialmente saturados y vibrantes para llamar la atención de los más pequeños. Además,

este tipo de comunicación gráfica, de trazo simple y más grueso, suele mostrar asociaciones más evidentes (por ejemplo, el color verde por su relación con la fotosíntesis) y representaciones simples en forma de iconos y símbolos (como el pájaro) para que el alumno establezca un vínculo directo entre el concepto de estudio y la imagen con la que se lo relaciona. Estas ilustraciones no pretenden comunicar los saberes relacionados con las propiedades químicas; buscan mostrar a los alumnos la función y relevancia de los elementos químicos en el entorno diario sin indagar más en los contenidos que ofrece la tabla periódica. Se observan, por lo tanto, representaciones cálidas, afectuosas y cercanas que transmiten, a grandes rasgos, la importancia de los elementos para que sean comprensibles y significativos para los alumnos de estas edades. Las imágenes que aparecen en edades superiores (9 a 12 años) en la figura 2 (Cámara Olim et al., 2024; Dugas, 2011; Gomis et al., 2021; Schreiber, 2017; Zamudio et al., 2024) son más complejas en cuanto a las características que presentan y al grado de detalle, alejándose del estilo más *cartoon*, iconográfico y naíf que se percibe en el primer ciclo de primaria. La comunicación visual de estos años utiliza otras técnicas de realización de imagen gráfica como el modelado en 3D o las imágenes generadas con inteligencia artificial. A este tipo de representaciones con más grado de detalle se incorporan, además, códigos científicos estándar (como el código de color CPK para representar átomos de distintos elementos químicos) y simbologías didácticas (personajes que representan el elemento del carbono por sus características antropomorfas). Estos recursos requieren un nivel de comprensión mayor porque su interpretación es más compleja al ser imágenes detalladas que no representan los conceptos de manera literal.

Enfoque pedagógico. Las representaciones gráficas del primer ciclo de primaria (6 a 8 años) son personajes, animales y objetos concretos que los niños de estas edades pueden ver e imaginar con facilidad. La planta, el pájaro o el monstruo verde (Dihm, 2020; Enevoldsen, 2016; Martínez, 2023) son ejemplos de ilustraciones y símbolos sencillos con los que los alumnos están más familiarizados, hecho que les facilita la comprensión de los saberes de una manera más cercana, emocional y entretenida. Los niños pueden hacer, de este modo, una asociación visual y afectiva entre las representaciones gráficas que ven y los contenidos que se les asocia. A partir de los 9 o 10 años, las imágenes que encontramos (Cámara Olim et al., 2024; Stuart, 2020; Gomis et al., 2021) presentan carac-

terísticas que muestran una transición de lo concreto a lo abstracto (por ejemplo, representando el átomo de carbono como una esfera gris siguiendo el esquema de color CPK). Estos modelos visuales no tienen un aspecto tan reconocible en la vida cotidiana como los mencionados anteriormente, por lo que se requiere que los alumnos sean más mayores para que puedan empezar a comprender ideas que no ven o que no tocan de manera directa. En estas edades también se pueden introducir imágenes de personas y objetos reales como apoyo gráfico (Peña, 2024; Zamudio et al., 2024), las cuales, al tratarse de representaciones realistas, contienen más detalles e información visual que las ilustraciones simples. El número de materiales gráficos de apoyo que encontramos de los 9-10 años en adelante es mayor. Esto se debe a que, según autores como Piaget (Escobar & Reinoza Dugarte, 2020; Pakpahan & Saragih, 2022) a partir de este momento es más adecuado introducir contenidos más abstractos porque los alumnos cuentan con una base de conocimientos científicos básica y empiezan a ser capaces de poder relacionar diferentes ideas entre sí, como por ejemplo entendiendo que el hidrógeno es un elemento químico y, a la vez, un gas.

El material gráfico aparece, en la mayoría de los casos hallados, plasmado en soportes y formatos físicos en lugar de digitales. Desde el punto de vista del aprendizaje, esta elección por parte de los autores responde a la necesidad de proporcionar representaciones gráficas de apoyo que incluyan, además de estímulos visuales, material tangible y manipulable que ayude a la comprensión en los diferentes niveles de educación primaria.

El papel emergente de la inteligencia artificial en la comunicación gráfica. La inteligencia artificial consiste en una herramienta poderosa por su capacidad de ofrecer representaciones gráficas de alta calidad y con un elevado nivel de personificación, lo que las hace ideales para poder acercar conceptos científicos más abstractos a alumnos de educación básica. Su flexibilidad y adaptabilidad a la hora de generar material visual la convierten en un recurso eficiente, capaz de reproducir contenido gráfico entendible en una gran variedad de estilos artísticos (realista, *cartoon*, abstracto, anime, etc.), formatos didácticos (mapas conceptuales, infografías, esquemas o *posters*) y técnicas artísticas que puede simular (acuarela, boceto, arte 3D, *collage*, etc.). Su rapidez en la obtención de recursos visuales, además, permite acelerar el proceso de realización de material de apoyo que sustente los conocimientos relacionados con los

elementos químicos, hecho que permite agilizar el trabajo docente. Estos atributos que reúne la inteligencia artificial le permiten hacer adaptaciones en un mismo contenido gráfico para ajustarse a las necesidades del autor o docente en la representación de saberes. Así, en casos como el de la novela corta de ficción *Elementos 6: la verdad* (Peña, 2024) o en el juego de cartas *Chemical Element Lotto* (Zamudio et al, 2024), la inteligencia artificial nos permite representar gráficamente realidades híbridas que integran cualidades perceptibles del entorno científico (la tabla periódica) y del humano (planeta Tierra). De este modo, esta herramienta es capaz de combinar, en una sola representación visual, un concepto científico (como el carbono entendido como elemento de la tabla periódica) con una perspectiva más próxima, real y antropomorfa para mostrar a los alumnos contenidos abstractos desde un punto de vista simbólico, a partir de una situación cercana a ellos como es el crecimiento de una persona (figura 3), la formación de una familia o un objeto cotidiano.

Sin embargo, la inteligencia artificial puede presentar dificultades a la hora de obtener imágenes ilustrativas porque no está al alcance del profesorado actual ni por conocimientos de desarrollo ni por recursos disponibles en tiempo y tecnología. Son varios los autores (Joynt et al., 2024; Petsiuk et al., 2022) que sugieren que los software de inteligencia artificial de pago y más especializados son capaces de generar contenido gráfico de mayor calidad y más coherente con los saberes científicos. En esta línea, Karsenti (2019) y Rondón-Morel et al. (2024) mencionan la necesidad de formación del personal docente en estas tecnologías para que sean capaces de integrar la inteligencia artificial en la educación de manera eficaz. Por lo tanto, se requiere presupuesto por parte de los centros educativos para disponer de software avanzados de inteligencia artificial y docentes que reúnan competencias y habilidades para manejarlos y, de este modo, se puedan obtener imágenes capaces de transmitir empatía o ternura para atraer a los alumnos de edades más tempranas. En los dos primeros ciclos de la educación primaria (6 a los 8 años) las representaciones gráficas deben ser, además de técnicamente correctas, emocionalmente significativas para conectar con los más pequeños en su aprendizaje. No obstante, las imágenes generadas con inteligencia artificial a partir de aplicaciones gratuitas, las que han sido obtenidas por personal con formación de usuario básico o que cuya descripción (*prompt*) no es lo suficientemente clara o específica respecto al contenido científico-didáctico, pueden presentar

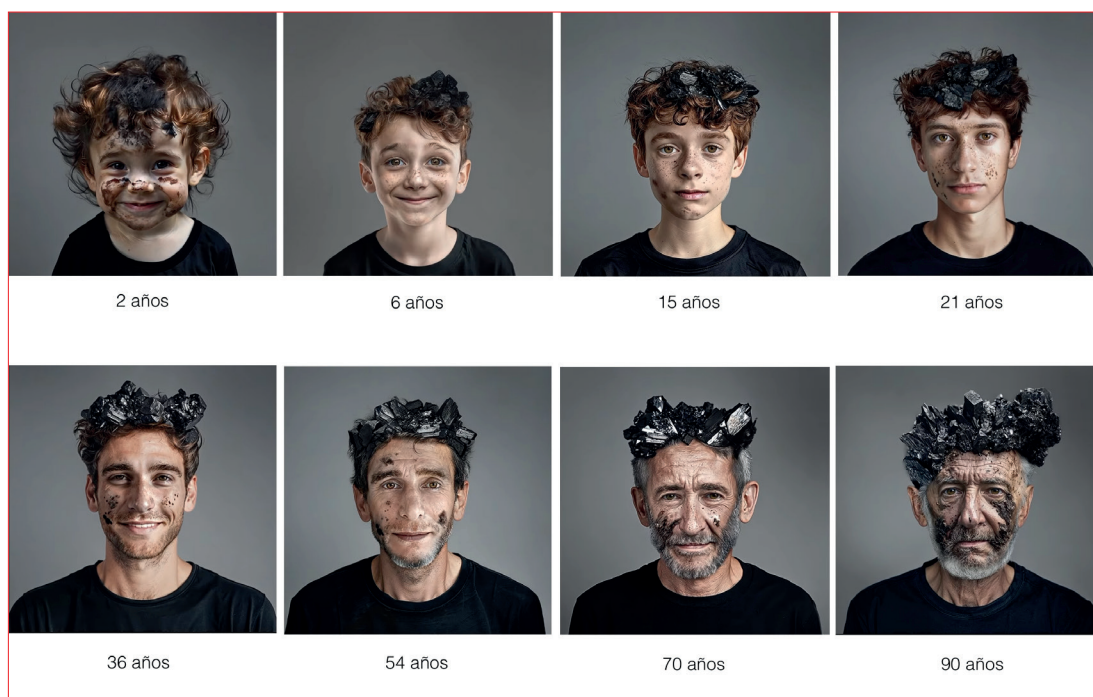


Figura 3. Comunicación gráfica del elemento químico del carbono realizado con inteligencia artificial, del libro Elementos 6: la verdad (Peña, 2024).

detalles ambiguos, superfluos, carentes de calidez y distantes del entorno infantil. Autores como Borji (2024) o Rubman (2024) muestran como esta situación puede dar lugar a personajes que a veces pueden parecer inexpresivos, impersonales, estáticos, presentar errores en la anatomía o con detalles visualmente extraños e inquietantes. La inteligencia artificial, por lo tanto, puede suponer una herramienta útil para representar la comunicación gráfica en alumnos de mayor edad en la educación primaria (9 a los 12 años), tal y como se ha visto en la tabla comparativa en la figura 2 (en la que encontramos la representación del diamante y del niño con características simbólicas del carbono en su apariencia física) y en la figura 3 (en la que encontramos la comunicación gráfica del libro Elementos 6), pero puede no captar los aspectos más emocionales que requiere una imagen que busque llamar la atención de los alumnos más pequeños de la educación primaria si no se la orienta con explicaciones precisas del resultado gráfico que se quiere conseguir.

Conclusiones

A partir del análisis realizado anteriormente, ha sido posible afirmar que los saberes relacionados con los elementos químicos y la tabla pe-

riódica pueden introducirse a partir de los 6 o 7 años siempre y cuando vayan acompañados de la comunicación gráfica adecuada a su desarrollo cognitivo y necesidades didácticas. Introducir los elementos químicos en los primeros años de la educación básica no busca adelantar los contenidos del área de ciencias, sino conseguir que los alumnos, desde edades tempranas, logren alcanzar un vínculo positivo con las asignaturas STEM para revitalizar estos ámbitos de conocimiento.

La manera en la que los saberes y sus recursos visuales de apoyo llegan significativamente al alumnado de estas edades es a partir de juegos didácticos, cómics, libros informativos y novelas de ficción acompañados de ilustraciones e imágenes realizadas con inteligencia artificial y experiencias inmersivas con dispositivos móviles. Estas herramientas, tanto físicas como digitales, consiguen captar la atención del alumnado, incrementan su motivación y participación en el aula mientras ayudan a que aprendan de forma significativa.

A la hora de establecer parámetros para preparar la comunicación gráfica más adecuada en este contexto educativo, es posible diferenciar dos etapas de desarrollo. En la primera (6-8 años), las representaciones gráficas deben ser fáciles de identificar, familiares, directas y cercanas, prefe-

riblemente tangibles (impresas o acompañadas de objetos o materiales manipulables) y con una reducción de contenidos. Por otro lado, en la segunda etapa (9-12 años) es posible ofrecer representaciones visuales más complejas, detalladas y menos concretas, realizadas a partir de otras técnicas de realización de imagen gráfica. A partir de los 9 años se han encontrado más herramientas y recursos gráficos (modelado 3D, inteligencia artificial) para introducir los elementos químicos porque el desarrollo cognitivo de los alumnos es mayor, lo que les permite entender mejor los contenidos abstractos representados visualmente a partir de símbolos e imágenes de diferentes estilos y técnicas de representación gráfica. En estas edades, la inteligencia artificial puede ser un recurso útil para aportar valor didáctico por su capacidad de dar apoyo, potenciar, complementar

el aprendizaje y agilizar el trabajo docente en la preparación de material gráfico sobre contenidos científicos como los elementos químicos, pero es dependiente de recursos técnicos y humanos.

La comunicación gráfica, por lo tanto, hace posible la comprensión y adquisición de saberes más abstractos que, a partir de técnicas de representación gráfica distintas (ilustración, modelado en 3D, inteligencia artificial) se hacen visibles. Este recurso permite que se produzca el razonamiento concreto, debido a que en estas edades los alumnos aún son dependientes de la percepción visual. De este modo, a partir de las representaciones gráficas que apoyan los contenidos, las áreas STEM pueden ofrecer una educación científica más lúdica, emocional e interactiva, más cercana al público K-6 que permite familiarizar a los alumnos en estos saberes desde la educación primaria.

Referencias bibliográficas

- Aygün, Aygöl & Abacı, Oya. (2014). Examination of illustrated story books published between the years of 2004–2013 for 4–8 age group children in terms of illustration. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 152, 94–99.
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.09.161>
- Bălan, Simona A.; van Bergen, Saskia K.; Blake, Ann; Buck, Topher; Coffin, Scott; DeWitt, Jamie C.; Goldenman, Gretta; von Hippel, Frank A.; von Hippel, Sophia; Leonetti, Christopher P.; Rist, David; Scheringer, Martin & Trier, Xenia. (2025). Confronting the interconnection of chemical pollution and climate change. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 55, Article100966.
<https://doi.org/10.1016/j.eist.2025.100966>
- Borji, Ali. (2024). *Qualitative Failures of Image Generation Models and Their Application in Detecting Deepfakes*. ArXiv.
<https://arxiv.org/abs/2304.06470>
- Câmara Olim, Sandra; Nisi, Valentina & Romão, Teresa. (2024). Augmented reality interactive experiences for multi-level chemistry understanding. *International Journal of Child-Computer Interaction*, 42, 100681.
<https://doi.org/10.1016/j.ijcci.2024.100681>
- Cass, María; Morales Rosales, Diana Carolina & Mayoral, Pedro J. (2021). *Study of the use of tangible-ludic materials in elementary school*. University of Colima.
<https://journal.ciex.edu.mx/index.php/CJ/article/view/124>
- Coveyou, John J. (2016). *Covalence: El juego de construcción de moléculas* [Juego de mesa]. Genius Games.
- Chowdhury, Pinaki. (2022). Learners' misconceptions in periodic table: An analysis of cognitive skills development. *Universal Journal of Educational Research*, 10(1), 57–66.
<https://doi.org/10.13189/ujer.2022.100106>
- De Alencar, Francisco Venicio Sousa; Da Silva, Antonio Fernando; Da Silva, Lucimar Machado & De Carvalho, Rusbene Bruno Fonseca. (2018). Developing a periodic table and a didactic game from alternative materials: Methodological proposals for science teaching. *Periódico Tchê Química*, 15(29), 219–227.
https://doi.org/10.52571/ptq.v15.n29.2018.219_periodico29_pgs_219_227.pdf
- Dihm, Andreas. (2020). *Elemonsters: Juego de cartas con aplicación* [Juego de mesa]. Autoedición.
<https://www.elemonsters.de/?q=en%2Fcardgame>
- Dugas, Kaycie. (2011). *The Elements: Personified* [Ilustraciones]. KcD Studios.
<https://kcdstudios.com/elements/>
- Enevoldsen, Keith. (2016). *The periodic table of elements in pictures*.
<https://elements.wlonk.com>
- Escobar, María Gisela y Reinoza Dugarte, Marianela. (Comps). (2020). *Psicología: Aportes a la educación y al aprendizaje*. Universidad de Los Andes, Vicerrectorado Académico.
- Farmer, Delphine K. & Prather, Kimberly A. (2020). A Chemical Perspective on Climate: Emerging Research into Atmospheric Chemistry Impacts on Earth's Radiative Balance. *Accounts of Chemical Research*, 53(11), 2496–2497.
<https://doi.org/10.1021/acs.accounts.0c00577>
- Farré, Andrea Soledad; Zugbi, Santiago y Lorenzo, María Gabriela. (2014). El significado de las fórmulas químicas para estudiantes universitarios. El lenguaje químico como instrumento para la construcción de conocimiento. *Educación Química*, 25(3), 274–283.
[https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(14\)70518-X](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(14)70518-X)
- Franco-Mariscal, Antonio Joaquín y Oliva-Martínez, José María. (2013). Evolución en el alumnado de la idea de elemento químico a lo largo del bachillerato. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 10(3), 353–376.
http://dx.doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2013.v10.i3.04
- Fundación CYD. (2023). *Informe CYD 2023: ¿Qué titulaciones estudian los universitarios en España y cómo es su inserción laboral?*
<https://www.fundacioncyd.org/informe-cyd-2023-que-titulaciones-estudian-los-universitarios-en-espana-y-como-es-su-insercion-laboral/>
- Gomis, Jordi; Morató, Jordi y Pujol, Ramón. (2021). *Synthesis* [Juego de cartas]. Falomir Juegos.
<https://falomirjuegos.com/tienda/synthesis/>
- Horikoshi, Ryo. (2021). Teaching chemistry with LEGO® bricks. *Chemistry Teacher International*, 3(3), 239–255.
<https://doi.org/10.1515/cti-2020-0017>
- Joynt, Veda; Cooper, Jacob; Bhargava, Naman; Vu, Katie; Kwon, O. Hwang; Allen, Tood R.; Verma, Aditi & Radaideh, Majdi I. (2024). A comparative analysis of text-to-image generative AI models in scientific contexts: A case study on nuclear power. *Scientific Reports*, 14, 30377.
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-79705-4>
- Karsenti, Thierry. (2019). Artificial intelligence in education: The urgent need to prepare teach-

- ers for tomorrow's schools. *Formation et Profession*, 27(1), 112-116.
<https://doi.org/10.18162/fp.2019.a166>
- Laski, Elida. V. & Wang, Muanjing Julia. (2023). A critical consideration of Montessori education in its relation to cognitive science and concrete-to-abstract thinking. En A. J. Murray, E.-M. T. Ahlquist, M. McKenna, & M. Debs (Eds.), *The Bloomsbury handbook of Montessori education* (pp. 241-250). Bloomsbury Academic.
<https://doi.org/10.5040/9781350275638.ch-24>
- Lorenzo, María Gabriela. (2021). Escribir y hablar en química: ¿Quimiqués o símbolos para construir conocimiento? *Enseñanza de Química*, 4(1), 8-24.
<https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/156831>
- Martínez, Javier. (2023). *Elemental Duel* [Juego de cartas]. Cayro.
<https://cayro.es/producto/elemental-duel/>
- Michailidis, Heracles; Michailidi, Eleni; Tavoulzidou, Stavroula & Fragulis, George F. (2020). *Teaching young learners a foreign language via tangible and graphical user interfaces*. ArXiv.
<https://arxiv.org/abs/2012.12000>
- Ministerio de Educación, Formación Profesional y Deportes. (2020). *Conocimiento del medio natural, social y cultural. Educación Primaria. Currículo LOMLOE*. Educagob.
<https://educagob.educacionfpydeportes.gob.es/curriculo/curriculo-lomloe/menu-curriculos-basicos/ed-primaria/areas/conocimiento-medio.html>
- Ministerio de Educación, Formación Profesional y Deportes. (2020). *Ley LOMLOE y criterios de evaluación para Física y Química en ESO*.
<https://educagob.educacionfpydeportes.gob.es/curriculo/curriculo-lomloe/menu-curriculos-basicos/ed-secundaria-obligatoria/materias/fisica-quimica/desarrollo.html>
- Ministerio de Educación, Formación Profesional y Deportes. (2023). *PISA 2022: Programa para la Evaluación Internacional de los Estudiantes. Informe español*. Librería de Educación.
https://www.libreria.educacion.gob.es/libro/pisa-2022-programa-para-la-evaluacion-internacional-de-los-estudiantes-informe-espanol_183950/
- Mokiwa, Hamza Omari. (2017). Reflections on teaching periodic table concepts: A case study of selected schools in South Africa. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 13(6), 1707-1717.
<https://doi.org/10.12973/eurasia.2017.00685a>
- Montejo Bernardo, José María & Fernández González, Alonso. (2021). Chemical Battleship: Discovering and Learning the Periodic Table Playing a Didactic and Strategic Board Game. *Journal of Chemical Education*, 98(3), 907-914.
<https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00553>
- O'Rourke, B. (2021). Growing gap in STEM supply and demand. *The Harvard Gazette*.
<https://news.harvard.edu/gazette/story/2021/11/increasing-access-and-opportunity-in-stem-crucial-say-experts/>
- Ortega, Pablo. (2020). *Atomic Bond!* [Juego de cartas]. Tero Ediciones.
<https://www.teroediciones.com/tienda/atomic-bond/>
- Pakpahan, Farida Hanum & Saragih, Marice. (2022). Theory of Cognitive Development by Jean Piaget. *Journal of Applied Linguistics*, 2(2), 55-60.
<https://doi.org/10.52622/joal.v2i2.79>
- Peña, Javier. (2018). *Elementos. El robo de las partículas de vida*. Editorial Caligrama
- , (2019). *Elementos 2. El imperio del Coltán*. Editorial Caligrama
- , (2021). *Elementos 3. Diversidad emocional*. Editorial Tregolam
- , (2024). *Elementos 6. La verdad*. Autoedición Amazon
- Petsiuk, Vitali; Siemenn, Alexander E.; Surbehera, Saisamrit; Chin, Zad; Tyser, Keith; Hunter, Gregory; Raghavan, Arvind; Hicke, Yann; Plummer, Brian A.; Kerret, Ori; Buonassisi, Tonio; Saenko, Kate; Solar-Lezama, Armando & Drori, Iddo. (2022). *Human evaluation of text-to-image models on a multi-taxi benchmark*. ArXiv preprint.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.12112>
- Quílez-Pardo, Juan. (2016). ¿Es el profesor de Química también profesor de Lengua? *Educación Química*, 27(2), 105-111.
<https://doi.org/10.1016/j.eq.2015.10.002>
- Ravishankara, Akkihebbal Ramaiah; Rudich, Yinon & Pyle, John A. (2015). Role of chemistry in Earth's climate. *Chemical Reviews*, 115(10), 5376-5396.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00226>
- Rees, Simon William; Kind, Vanessa & Newton, Douglas. (2019). Meeting the challenge of chemical language barriers in university level chemistry education. *Israel Journal of Chemistry*, 59(6-7), 470-477.
<https://doi.org/10.1002/ijch.201800079>
- Rondón-Morel, Raúl Octavio; Pacotaípe-Delacruz, Ronel; Alarcón-Núñez, Eber Abel y Yezpez-Salvatierra, Patricia Nieves. (2024). El impacto de la inteligencia artificial en la formación docente. *Revista Tecnológica-Educativa Docentes 2.0*, 17(2), 368-375.
<https://doi.org/10.37843/rtded.v17i2.566>

- Rubman, Jillian. (2024). *Supporting learning with AI-generated images: A research-backed guide*. MIT Solano Teaching & Learning Technologies.
<https://mitsloanedtech.mit.edu/2024/03/06/supporting-learning-with-ai-generated-images-a-research-backed-guide>
- Ruesta Quiroz, Ruth Giovanna y Gejaño Ramos, Cindy Victoria. (2022). Importancia del material concreto en el aprendizaje. *Franz Tamayo - Revista de Educación*, 4(9), 94–108.
<https://doi.org/10.33996/franztamayo.v4i9.796>
- Sánchez Borrero, Guillermo Ramón y Bravo Castañeda, Claudia Jenny. (2024). Diseño Gráfico se encuentra con Ciencias de la Educación: El enfoque innovador del proyecto «Libros que incluyen a todos» para la enseñanza del diseño editorial. *I+DISEÑO*, 19, 201–219.
<https://doi.org/10.24310/idiseo.19.2024.20370>
- Schreiber, Nathan. (2017). *Valence Plus: Usa la química real para descomponer las moléculas* [Juego de mesa]. Science Ninjas.
<https://www.scienceninjas.com/valence-plus>
- Stuart, Colin. (2020). *The extraordinary Elements: The Periodic Table Personified*. Big Picture Press.
<https://www.colinstuart.net/the-extraordinary-elements/>
- Talanquer, Vicente. (2022). The complexity of reasoning about and with chemical representations. *JACS Au*, 2(12), 2658–2669.
<https://doi.org/10.1021/jacsau.2c00498>
- Valdés-González, Aránzazu y Martín-Antón, Javier. (2023). La tabla periódica y las lenguas de signos. Una revisión sistematizada. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 20(1), 1102.
https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2023.v20.i1.1102
- Von Schneidmesser, Erika; Monks, Paul S.; Allan, James. D.; Bruhwiler, Lori; Forster, Piers; Fowler, David; Lauer, Axel; Morgan, William T.; Paasonen, Pauli; Righi, Mattia; Sindelarova, Katerina & Sutton, Mark A. (2015). Chemistry and the linkages between air quality and climate change. *Chemical Reviews*, 115(10), 3856–3897.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00089>
- Wilcox, Jennifer; Psarras, Peter C. & Liguori, Simona. (2017). Assessment of reasonable opportunities for direct air capture. *Environmental Research Letters*, 12(6), 064007.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6de5>
- Zamudio, José Omar; Miguel-Gómez, Jesús Eruviel; Santiago, Andrea; Montañó-Hilario, José Manuel; Franco-Bodek, Daniela; García-Ortega, Héctor; Reina, Antonio & Reina, Miguel. (2024). Chemical Element Lotto: