



## Interpretación a nivel molecular del enlace de hidrógeno en el agua: dificultades conceptuales en alumnado universitario

*Molecular interpretation of the hydrogen bonding in the water: conceptual difficulties by university students*

Gabriel Pinto Cañón<sup>1</sup>

### Resumen

Se introduce la relevancia de la consideración de las ideas o concepciones alternativas, y su consecuencia en los errores conceptuales de los alumnos. Seguidamente, se explican los resultados alcanzados en una investigación realizada sobre su comprensión del enlace de hidrógeno, a nivel atómico-molecular, en el agua líquida. Para ello, se analizan las respuestas de alumnos de primer curso de Grado en Ingeniería Química y de Máster de Formación del Profesorado, al solicitarles que lo describieran, con ayuda de un dibujo o esquema, a partir de sus conocimientos adquiridos en cursos anteriores. No se encontraron diferencias significativas entre alumnos de las citadas titulaciones ni en los tres cursos académicos durante los que se desarrolló el estudio. Un 48% fue capaz de razonar aceptablemente la cuestión, y en el resto, se encontraron concepciones alternativas que implican aspectos como: considerar atracciones entre átomos de hidrógeno de distintas moléculas de H<sub>2</sub>O; entender que se refiere a los enlaces covalentes O-H de cada molécula de H<sub>2</sub>O; interpretar que cada átomo de H se une por enlace covalente a dos de O de sendas moléculas de H<sub>2</sub>O; y considerar formas moleculares extravagantes o 'ingenuas', entre otros. Finalmente, se describe cómo esta información es de utilidad para abordar la práctica educativa y, especialmente, el conocimiento didáctico del contenido.

### Palabras clave

Concepción alternativa; Conocimiento didáctico del contenido; Enlace de hidrógeno; Error conceptual; Estructura atómico-molecular de la materia; Idea previa.

### Abstract

The relevance of the consideration of alternative ideas or conceptions, and their consequence on students' misconceptions, is introduced. Then, the results of research on their understanding of hydrogen bonding, at the atomic-molecular level, in liquid water are explained. To this end, the responses of first-year students in the bachelor's degree in chemical engineering and the master's degree in Teacher Training are analysed, when they were asked to describe it, with the help of a drawing or diagram, based on their knowledge acquired in previous years. No significant differences were found between students of the degrees or in the three academic years during which the study was carried out. Forty-eight percent were able to reason the question acceptably, and the rest found alternative conceptions involving aspects such as: considering attractions between hydrogen atoms of different H<sub>2</sub>O molecules; understanding that it refers to the covalent O-H bonds of each H<sub>2</sub>O molecule; interpreting that each H atom is joined by covalent bonds to two O atoms of each H<sub>2</sub>O molecule; and considering extravagant or 'naive' molecular shapes, among others. Finally, it is outlined how this information is useful for educational practice and, especially, for the pedagogical content knowledge.

### Keywords

Alternative conception; Atomic-molecular structure of matter; Hydrogen bonding; Misconception; Pedagogical content knowledge (PCK); Previous idea.

<sup>1</sup> Catedrático de Ingeniería Química en la Universidad Politécnica de Madrid, Doctor en Ciencias Químicas por la Universidad Complutense de Madrid y presidente del grupo especializado de Didáctica e Historia de las Reales Sociedades Españolas de Física y de Química. <https://orcid.org/0000-0002-8961-7255>. Correo de contacto: [gabriel.pinto@upm.es](mailto:gabriel.pinto@upm.es)

## Introducción

Está ampliamente reconocido el papel relevante de las conocidas como ideas, preconcepciones o concepciones alternativas, que el alumnado construye respecto de distintos fenómenos, en el aprendizaje de conceptos científicos. Suponen un obstáculo para el aprendizaje de nuevos conceptos porque, además de configurar un cuadro explicativo y predictivo, están muy arraigadas (Ramos et al., 2001).

Según Furió et al. (2006), un error conceptual es una "respuesta equivocada" que afecta a un concepto científico determinado, que se debe a la existencia en la mente de la persona que lo expresa, de una concepción alternativa (representación del concepto diferente a la aceptada dentro del cuerpo teórico de conocimientos científicos en uso). Además, sugieren que las concepciones alternativas no deben considerarse como un impedimento al aprendizaje, sino como el punto de partida necesario con el que se ha de contar para que los alumnos lleguen a construir los nuevos conocimientos.

En concreto, Furió y Furió (2020) señalan que cuando se pregunta a los alumnos por lo que significa para ellos una 'realidad externa', suele emerger de su respuesta una visión realista 'ingenua' tanto de la imagen directa de los sentidos —como que "los gases no se ven ni se tocan", por ejemplo— como del nivel microscópico de descripción de la materia. Otra faceta del pensamiento de los alumnos, de acuerdo con estos autores, deriva de su integración en el medio social y cultural, particularmente transmitido a través del lenguaje. También inciden en que buena parte de las concepciones alternativas de los alumnos se deben a la impulsividad o 'falta de reflexión metodológica', siguiendo criterios poco rigurosos. Así, distinguen concepciones alternativas que se originan por formas de razonar, como: la 'metodología de la superficialidad o del sentido común', caracterizada por una gran rapidez para extraer conclusiones, a partir de solo unas pocas observaciones cualitativas que suelen ser poco fundamentadas; o por aceptar evidencias asumidas en la cultura cotidiana como verdades; el 'causalismo simple' —inspirado en criterios poco rigurosos, como la semejanza entre causa y efecto—; la 'fijación funcional' —aprendizaje memorístico de conceptos y reglas que impiden tanto la reflexión como el pensamiento creativo—; la 'reducción funcional' —se considera solo una única variable para analizar una variable dependiente o efecto que depende de varias causas—; y el 'razonamiento en secuencias lineales', paso a paso, cuando se requiere en realidad un análisis holístico.

Conocer las ideas alternativas del alumnado es un aspecto que ha de tener en cuenta el profesorado para construir materiales curriculares y para el desarrollo de estrategias adecuadas en la práctica educativa. Así, las perspectivas didácticas deberían crear las mejores condiciones para que los alumnos modifiquen sus concepciones elaboradas anteriormente, generando otras más congruentes con la versión científica. Muchos autores (Larkin, 2012; Martín del Pozo et al., 2014) inciden en el hecho de que el estudio sobre las ideas de los alumnos es una herramienta importante para ayudar al profesorado a cuestionarse y transformar su propio conocimiento didáctico del contenido —conocido por las siglas PCK, del inglés *Pedagogical Content Knowledge*—, aspecto esencial para plantear el proceso de enseñanza y aprendizaje.

Desde la perspectiva constructivista, la mente del alumno, activa y creadora, construye y reconstruye sus concepciones del mundo que le rodea. A través del proceso

de enseñanza-aprendizaje, estas concepciones interactúan e intervienen con la visión científica que aporta el profesor con nuevas informaciones. Fruto de esta interacción, surgen significados nuevos y se construyen los conceptos científicos. Por ello, el análisis de las ideas alternativas de los alumnos ha sido una de las líneas de investigación más abordadas en el área de Didáctica de las Ciencias. Además, como indican Martín del Pozo et al. (2014), la predisposición a considerar las ideas de los alumnos ayuda a mantener a los docentes alejados del modelo meramente transmisivo de la enseñanza.

Normalmente, los estudios de concepciones alternativas se refieren a educación primaria y secundaria, así como al profesorado en formación correspondiente. De hecho, los errores conceptuales de profesores coinciden en gran medida con los de sus alumnos. A modo de ejemplo, el estudio de Hämälä-Braskén et al. (2020) muestra que entre un 40% y un 80% del profesorado de educación primaria en Finlandia tienen los mismos tipos de errores conceptuales que sus alumnos (de 5 a 12 años), dependiendo de los conceptos investigados.

Las concepciones alternativas de los alumnos sobre propiedades físicas y químicas del agua han sido algunas de las más estudiadas, casi siempre referidas a alumnos de etapas educativas preuniversitarias (Fries-Gaither, 2008; Marcén y Cuadrat, 2012; Giraldo Toro et al., 2015).

Como ejemplo de la complejidad consustancial a la comprensión de fenómenos que implican al agua, destaca el estudio de Smith y Villarreal (2015), que analizaron, en este caso con alumnos universitarios de primer curso, el concepto de posición de partícula en el cambio físico reversible de agua líquida y sólida en un proceso de fusión-congelación y en la disolución de sólidos en el medio acuoso. A pesar de la visualización del proceso a nivel de partículas y su discusión, las concepciones erróneas persistían.

Si bien se dispone de mucha información sobre las concepciones alternativas, se abordó el presente estudio para contribuir al conocimiento de la comprensión por parte del alumnado de un fenómeno concreto, como es la formación de enlaces de hidrógeno, que tiene importantes consecuencias para interpretar propiedades de muchas sustancias. Su objetivo principal fue identificar las concepciones alternativas del alumnado de distintos cursos universitarios respecto de los conceptos esenciales para la comprensión de dicho fenómeno y, en concreto, de su interpretación a nivel atómico-molecular. Con este análisis, se continúa una línea de investigación iniciada ya hace unos años por el autor (Martín Sánchez et al., 2015).

Las ideas de los alumnos implican conocimientos alternativos que, a nivel universitario, puede significar que se utilicen habitualmente a lo largo de su vida, por lo que merece la pena que los docentes se esfuercen en su análisis.

Los errores conceptuales e ideas alternativas relacionados con el enlace químico, han sido objeto de un buen número de estudios (Özmen, 2004; Melfafina et al., 2019). Ballester Pérez et al. (2017), comparando las concepciones alternativas de alumnos universitarios de primer curso y de bachillerato, encontraron, entre otros aspectos referentes a los distintos tipos de enlace químico, que es común en ambos colectivos no entender la naturaleza del enlace de hidrógeno y asumir, por ejemplo, que se da en cualquier molécula que tiene hidrógeno además de nitrógeno, oxígeno o flúor, independientemente de que el átomo de hidrógeno se una directamente a esos átomos o no.

Caamaño (2016) analizó la forma tradicional en la que los conceptos de enlace químico y estructura de las sustancias se presentan, tanto en los libros de texto como en las aulas de educación secundaria y bachillerato. Tras criticar el enfoque tradicional, resalta las concepciones alternativas a que da lugar y las ambigüedades terminológicas que fomenta, proponiendo, por el contrario, un enfoque didáctico que intente superar las dificultades y errores conceptuales caracterizados. Por ejemplo, sugiere, sobre el enlace de hidrógeno, que es “más correcto conceptualizarlo y denominarlo un enlace y no como una fuerza intermolecular, ya que es un enlace direccional que se caracteriza por tener una longitud y una dirección determinada”, además de que su intensidad es más cercana a la de un enlace covalente que a la de las fuerzas intermoleculares.

### Metodología de estudio

El estudio se ha llevado a cabo durante tres cursos académicos, desde el 2020/21 al 2022/23, con alumnado de primer curso del Grado en Ingeniería Química (17 a 18 años) y de Máster de Formación del Profesorado (edad variable, entre 23 y 50 años) —título habilitante para ejercer la profesión de profesor de educación secundaria, bachillerato y formación profesional en España—, en la especialidad de Física y Química, ambos impartidos en la Universidad Politécnica de Madrid.

Como instrumento para llevar a cabo la investigación educativa, se indica a los alumnos que realicen, en un papel, durante un tiempo máximo de 8 minutos, un dibujo o esquema en el que se represente cómo entienden que es el ‘enlace de hidrógeno’ en el agua líquida. Se les solicita antes de abordar el estudio del tema del enlace químico, por ser un concepto que han abordado ya en cursos anteriores —véase, por ejemplo, el libro de bachillerato de Quílez et al., 2009—, pero normalmente al final del tema y de forma rápida.

En total, respondieron a lo largo de los tres cursos citados, 203 alumnos de primer curso del Grado de Ingeniería Química, y 82 alumnos del Máster de Formación del Profesorado.

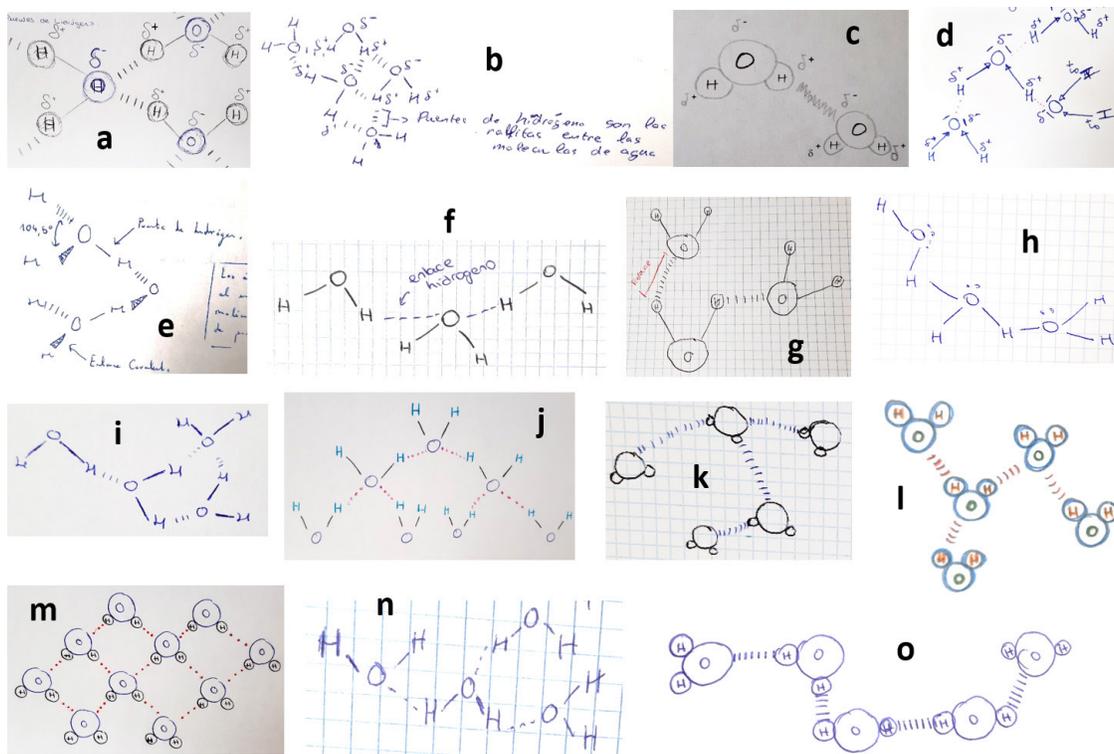
Tras analizar los documentos con las figuras elaboradas por los alumnos, el profesor se los entrega de nuevo, con las correcciones pertinentes (evaluación individual), y se explican y discuten en el aula, mediante una puesta en común, tanto los errores generales cometidos como las respuestas correctas (evaluación grupal). Con ello se pretende que los alumnos, aparte de mejorar la comprensión del fenómeno concreto, se formen en el razonamiento para interpretar fenómenos fisicoquímicos, en función de la estructura atómico-molecular. Por otra parte, es el punto de partida para iniciar el estudio del enlace de hidrógeno con más profundidad.

### Análisis y discusión de resultados

Del análisis de los resultados de los dibujos realizados por los alumnos, se infiere que no hay diferencias reseñables entre los distintos cursos académicos, ni tampoco entre los que cursan el Grado en Ingeniería Química y los del Máster de Formación del Profesorado. Por ello, se aportan los resultados de forma global. A priori, se pensaba que los alumnos de Máster ofrecerían respuestas más plausibles. Probablemente, se deba a que el enlace de hidrógeno se suele tratar solo de forma ‘puntual’ —como un enlace intermolecular ‘particular’— en cursos previos y al final del tema de enlace químico —donde se da más relevancia a los enlaces covalente e iónico—, dentro de los programas curriculares.

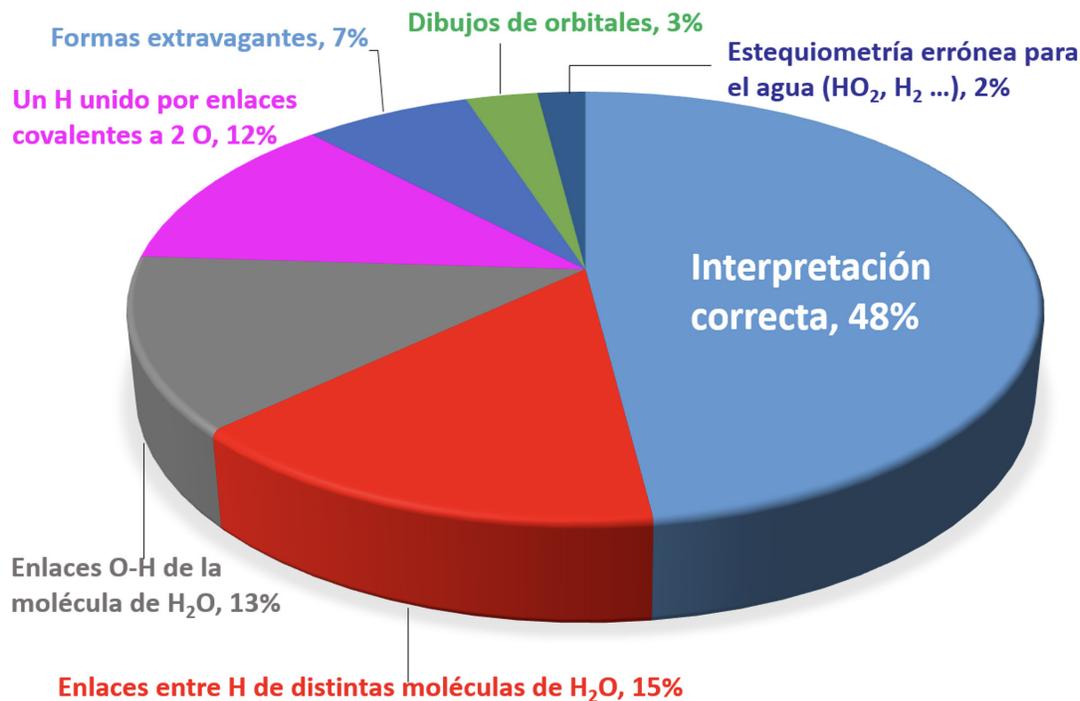
La realización del dibujo pretende ser de valor formativo para el alumnado: con él, se les invita a cuestionarse sobre un fenómeno a nivel atómico-molecular, importante para interpretar propiedades peculiares tanto del agua como de otros muchos compuestos. Además, tiene un extraordinario valor para el profesor, pues le permite conocer, junto con otras actividades de evaluación similares, el nivel de abstracción que poseen sus alumnos sobre la estructura de la materia.

La práctica totalidad de los alumnos, salvo casos puntuales, entienden (según se desprende de sus trabajos) que el agua está formada por moléculas de  $H_2O$  y que estas tienen geometría angular. Un 48% del alumnado fue capaz de interpretar aceptablemente en qué consiste el enlace de hidrógeno demandado, mostrando esquemas como los recogidos en la Figura 1. Dentro de ellos, solo una minoría introduce la existencia de cargas eléctricas parciales por la distribución asimétrica de los pares de electrones compartidos entre el átomo de O y cada átomo de H en cada molécula de agua (ver Figura. 1a a 1d), pero la mayoría no lo hace (ver Figura. 1e a 1o). La mayor parte distingue los enlaces de hidrógeno (que muchos denominan ‘puentes de hidrógeno’) con línea de trazos, frente a los enlaces covalentes (con líneas continuas), aunque algunos no hacen la distinción (ver Figura. 1h).



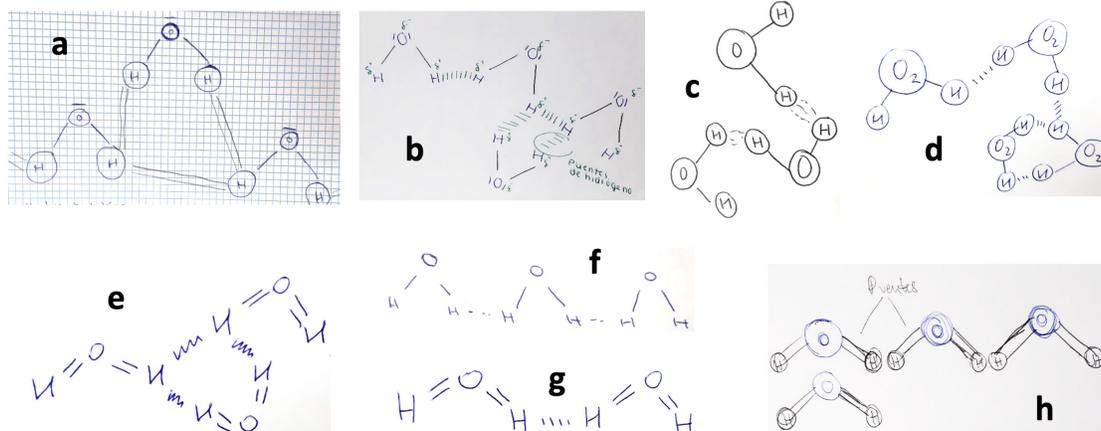
**FIGURA 1.** Dibujos realizados por los alumnos, que interpretan correctamente el enlace de hidrógeno entre moléculas de agua líquida.

El 52% de los alumnos restantes manifiestan concepciones alternativas que se pueden agrupar (ver en la Figura 2 los porcentajes de respuesta asociados) en aspectos como:



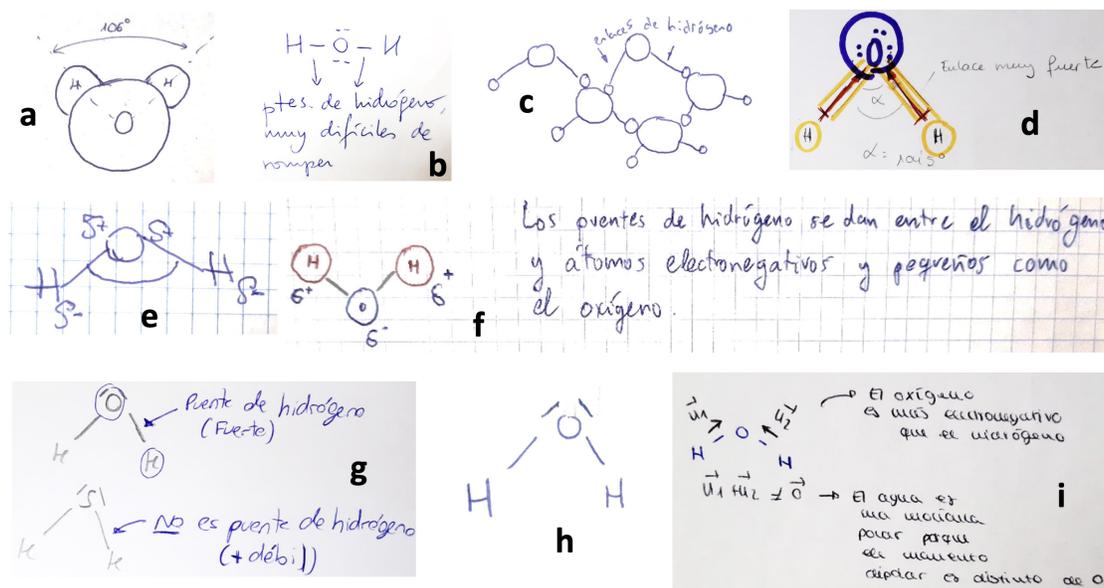
**FIGURA 2.** Porcentajes del tipo de respuestas de los alumnos sobre la naturaleza del enlace de hidrógeno en el agua líquida.

- Considerar atracciones entre átomos de hidrógeno de distintas moléculas de H<sub>2</sub>O. En este caso, del que se muestran algunos ejemplos en la Figura 3, la propia ‘nomenclatura’ del término juega en contra de la comprensión del fenómeno, dado que por ‘enlace de hidrógeno’ hay alumnos que interpretan ‘literalmente’ que involucra solo a átomos de dicho elemento. En algunos se introducen, además, enlaces dobles O=H para las moléculas de agua (ver Figura. 3e y 3g) o consideran que el átomo de oxígeno del agua es O<sub>2</sub> (ver Figura. 3d), lo que muestra que no se distingue bien entre lo que es el oxígeno atómico y el molecular.



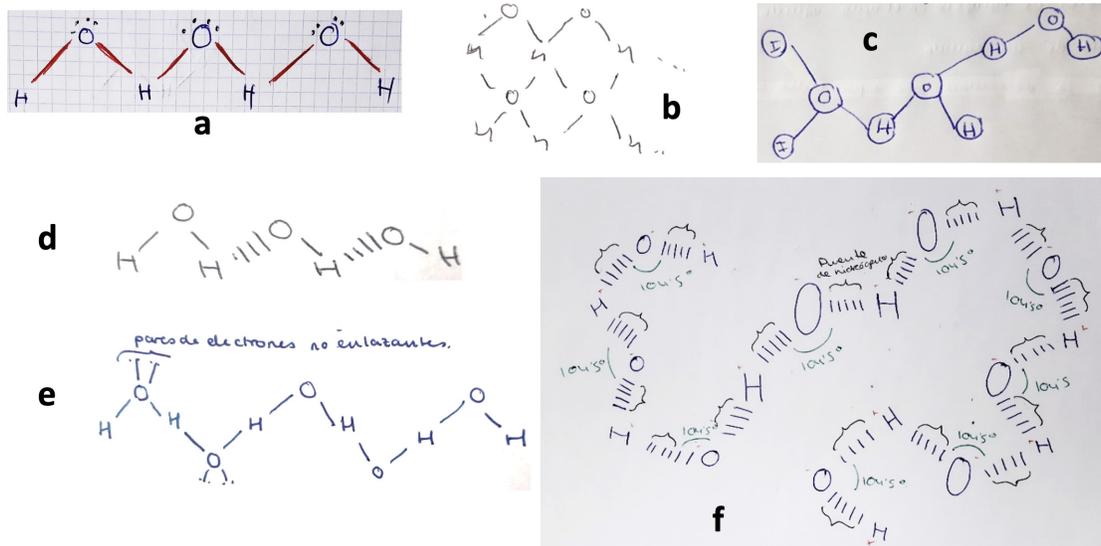
**FIGURA 3.** Dibujos realizados por los alumnos, que interpretan erróneamente el enlace de hidrógeno en el agua líquida, como atracciones entre átomos de H de moléculas contiguas.

- Entender que se refiere a los enlaces covalentes O-H de la molécula de  $H_2O$ , como los casos recogidos en la Figura 4. Son, en general, alumnos que no conocen lo que significan los enlaces intermoleculares, y piensan que solo se producen enlaces de dos tipos: covalente (para unir átomos formando moléculas) e iónico (que une iones de distinto signo para constituir redes iónicas). Aunque han estudiado en años anteriores otros tipos de enlace, como son los intermoleculares y el metálico, no los tienen interiorizados. Algunos, como el que efectuó la Figura. 4f, incluso definen bien lo que es el enlace de hidrógeno, pero al representarlo, se ve que lo confunden con los enlaces covalentes O-H de las moléculas de agua. Algo análogo trasluce el ejemplo de la Figura. 4g, que refleja que el alumno que la realizó entiende que no se forman enlaces de hidrógeno cuando este átomo está unido por enlace covalente al S en vez de al O, pero lo expresó mal en el dibujo correspondiente. Este tipo de resultados acrecienta el interés pedagógico de estos ejercicios.



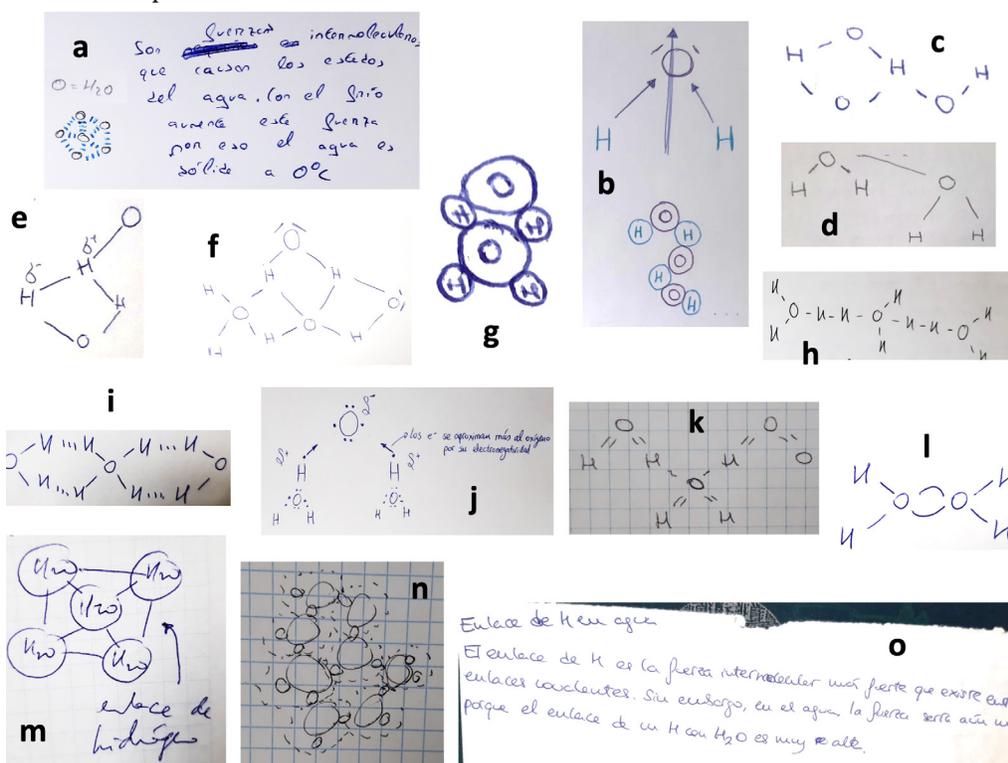
**FIGURA 4.** Dibujos hechos por los alumnos, que interpretan erróneamente el enlace de hidrógeno en el agua líquida como el enlace covalente O-H que se da dos veces en cada molécula de agua.

- Interpretar que cada átomo de H se une por enlace covalente a dos de O, de sendas moléculas de  $H_2O$ , como se aprecia en los ejemplos de la Figura 5. Puede ser debido a que todavía se explica por muchos profesores y en diversas fuentes bibliográficas, con la denominación de ‘puentes de hidrógeno’, como alternativo al término de ‘enlaces de hidrógeno’, según se hacía hasta hace un tiempo. Denota que los alumnos no tienen suficientemente asimilado que un átomo de hidrógeno solo puede formar un enlace covalente. Este tipo de enlace que describen sí es el que se da en los boranos, donde existen ‘puentes’ B-H-B, cuyo tratamiento excede lo abordado en este trabajo.



**FIGURA 5.** Dibujos realizados por los alumnos, que interpretan erróneamente el enlace de hidrógeno en el agua líquida por formación de ‘cadenas’ -H-O-H-O-H-

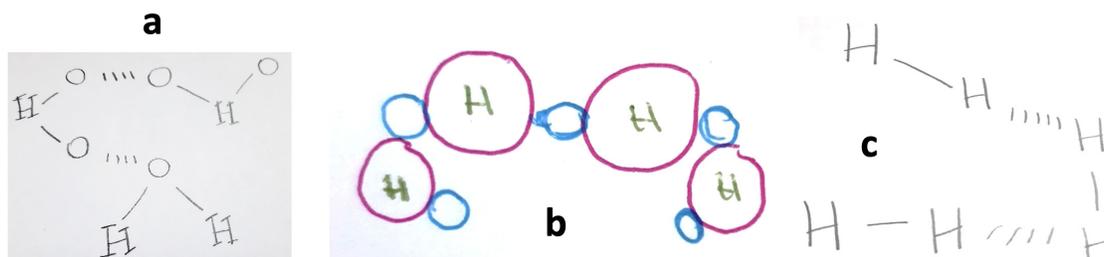
- Considerar formas moleculares extravagantes, debido a ideas simplistas o ingenuas, como se recoge en la Figura 6. Aparte de que hay alumnos que piensan que ‘todo vale’ para unir átomos, algunos quizá responden de forma muy rápida, sin dedicar el tiempo suficiente para la necesaria reflexión. A veces se agrupan varios errores conceptuales (ver Figura. 6b, 6c, 6h, 6i, 6k, 6l) o se encuentra alumnos (ver Figura. 6o) que no realizan el dibujo e incluyen solo una definición extemporánea.



**FIGURA 6.** Dibujos hechos por los alumnos, que interpretan el enlace de hidrógeno en el agua líquida con ideas simplistas o ingenuas.

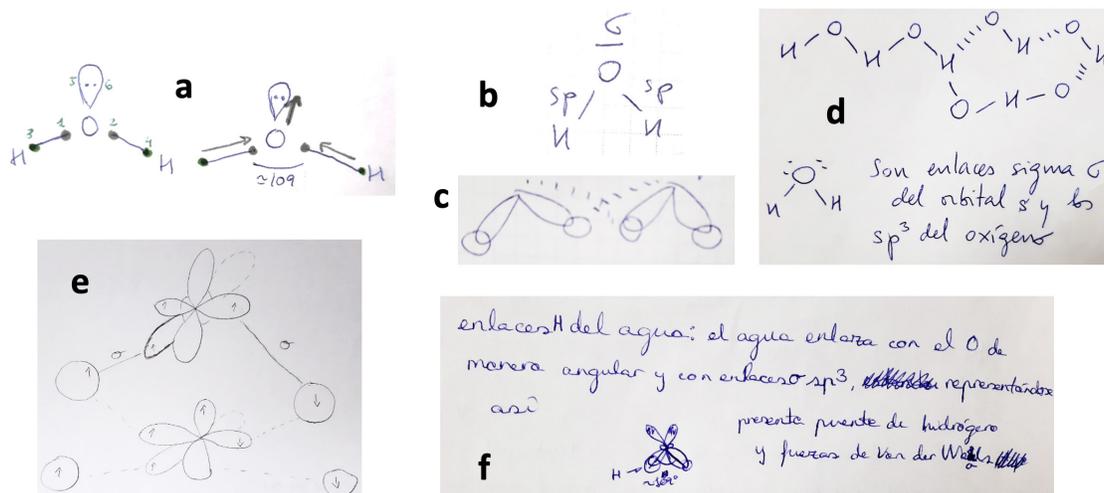
- Equivocarse en la propia fórmula del agua (considerándola como  $H_2$  o  $HO_2$ ), como se recoge en la Figura 7. Son casos aislados, probablemente debidos, como en el anterior, a la rapidez y falta de atención en la respuesta. Una vez más, hay ejemplos, como el de la Figura. 7b donde se yuxtaponen varios errores conceptuales.

**FIGURA 7.** Dibujos hechos por los alumnos, que equivocan la estequiometría del agua.



- Incluir orbitales atómicos sin especial sentido (ver Figura 8). En estos casos, los alumnos parece que piensan que tienen que recoger en su explicación algo que han visto antes en las clases de la asignatura. Incluso, hay alumnos que más que pensar sobre lo preguntado, consideran sobre lo que creen que ‘contentará’ al profesor. En todo caso, suelen demostrar que no tienen bien asimilados los conceptos que explican; así, la persona que realizó la Figura. 8b mezcla orbitales híbridos  $sp$  (deberían ser  $sp^3$ ) con un enlace sigma (quizá confundiéndolo con un par solitario de electrones), y se ‘olvida’ de otros dos electrones de valencia del O.

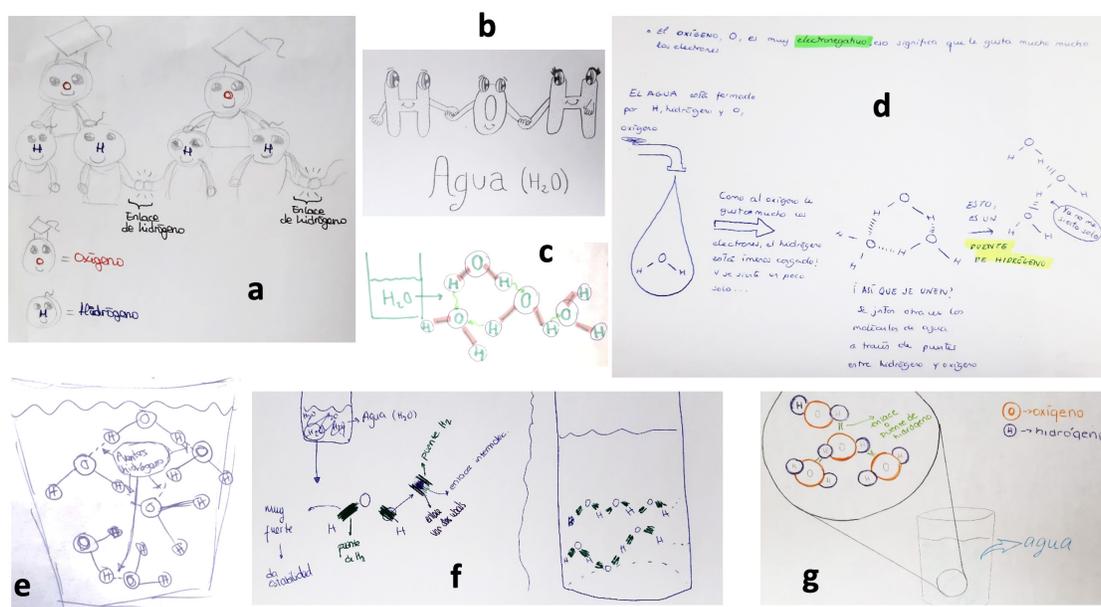
**FIGURA 8.** Dibujos realizados por los alumnos, que interpretan el enlace de hidrógeno en el agua líquida, considerando orbitales atómicos sin un sentido claro y manifestando errores conceptuales.



Muchas de las respuestas de los alumnos reflejan lo aportado por Furió y Furió (2020), ya referido en la introducción, que revisaron las dificultades conceptuales y epistemológicas de los alumnos sobre algunos conceptos básicos (naturaleza corpuscular de la materia, sustancia y compuesto químico) cuya superación es necesaria para poder interpretar adecuadamente los procesos químicos. También, gran parte de las generalizaciones erróneas que cometen los alumnos, se basan en la aplicación de una visión realista ingenua que poseen sobre el mundo natural al nivel microscópico de descripción de la materia. En palabras de los citados autores, los alumnos “no comprenden que existen distintos niveles de descripción de la materia en íntima relación: el nivel macroscópico de las sustancias con sus propiedades y cambios y, por otra parte, el nivel microscópico de aquellas mismas sustancias que la Química modela a base de átomos iones o moléculas”.

Normalmente, los alumnos se sorprenden de que el profesor les indique que realicen un dibujo como herramienta de evaluación, pues están más acostumbrados a resolver problemas o responder a preguntas por escrito o tipo test. Hay que decir, al respecto, que es una técnica que el autor de este trabajo hace a menudo con sus alumnos, para que compartan sus ideas y desarrollen la capacidad de abstracción.

Ya se ha comentado que no se encontraron diferencias significativas entre los alumnos del Grado de Ingeniería estudiado ni los que cursan el Máster de Formación del Profesorado. En todo caso, la única diferencia es que, en mayor medida (aunque de forma aislada), los alumnos de este Máster introducen a veces (con mayor o menor acierto) vertientes pretendidamente más didácticas, como son los casos de la Figura 9. Estas imágenes no siempre son acertadas, como se observa en la Figura. 9a (se ‘dan la mano’ los átomos de hidrógeno), Figura. 9b (se limita a representar una molécula de agua y, además, con geometría lineal) y Figura. 9f (es un caso similar a los recogidos en la Figura. 5). En todo caso, sí que reflejan una creatividad interesante en muchos casos y, tras la discusión en clase, pueden reorientarse sus ideas gráficas para destacar adecuadamente la naturaleza del enlace de hidrógeno.



**FIGURA 9.** Dibujos realizados por los alumnos del Máster de Formación del Profesorado, donde se interpreta en algún caso de forma errónea el enlace de hidrógeno, pero con una marcada intención didáctica.

### Aplicación de los resultados en la práctica docente

Aunque no es el objetivo principal de este trabajo, se considera conveniente resumir cómo ha influenciado el análisis de las respuestas de los alumnos en la acción docente del autor.

Tanto en el caso estudiado, como en otros relacionados con la asimilación de interacciones entre moléculas, una dificultad adicional para la comprensión de los distintos fenómenos, a nivel microscópico, es que las representaciones se suelen realizar en un plano (papel, pizarra, tablet...), pero es conveniente introducir a los alumnos en el hecho de que, en la realidad, se produce en tres dimensiones. Para ello, resulta importante que, aparte de visualizar dibujos en libros o páginas web adecuadas, e implicarse en su representación, los alumnos visualicen vídeos o dibujos en los que se muestre el fenómeno

en 3D. Por ejemplo, un vídeo muy didáctico, recomendable para observar la naturaleza de los enlaces de hidrógeno formados entre las moléculas de agua líquida, es el publicado por Wayne Breslin (2019).

Entre otros estudios sobre ideas alternativas y enfoques didácticos que podrían mejorar la comprensión del enlace de hidrógeno, se destaca el texto de Gültepe (2021) y el reciente artículo de Goalby (2023).

En concreto, el autor de este trabajo, tras la puesta en común en el aula de las respuestas generales de los alumnos, aborda el tema insistiendo en la naturaleza del enlace de hidrógeno: fuera de atracción electrostática entre átomos de hidrógeno unidos por enlace covalente a otros átomos muy electronegativos y pequeños (F, O o N) con otros átomos de F, O o N de otra molécula (enlace intermolecular) o de la misma molécula (enlace intramolecular). Seguidamente, discute con los alumnos ejemplos de otras moléculas distintas del agua entre las que se daría el enlace de hidrógeno (metilamina, etanol, etc.) o no (hidrógeno molecular, metoximetano, etc.), así como algunos fenómenos asociados al citado enlace, como son: que el agua,  $H_2O$ , sea líquida a temperatura ambiente y el sulfuro de hidrógeno,  $H_2S$ , sea gas; que el calor de vaporización del amoníaco,  $NH_3$ , sea mayor que el del fosfano,  $PH_3$ ; o que el etanol,  $CH_3CH_2OH$ , se disuelva mucho mejor en agua que el etanal,  $CH_3CHO$ .

Por otra parte, Caamaño (2016) sugiere que se discuta con los alumnos sobre la variedad de representaciones gráficas (raya o línea de puntos) que se utilizan para representar los diferentes tipos de enlace, lo que puede ser de interés para que se comprenda mejor la diferencia entre el enlace covalente (normalmente representado por una línea continua) y el enlace de hidrógeno, que, por su menor intensidad, se suele representar por una línea de trazos.

Alrededor de un mes después de la puesta en común en el aula, el autor repite el ejercicio con sus alumnos, para valorar la incidencia que tuvo en el aprendizaje. Se aprecia entonces que el porcentaje de alumnos que razonan adecuadamente sobre la naturaleza del enlace de hidrógeno pasa del 48% al 80%. Cerca del 15% de los alumnos mantienen al cabo del mes sus propias concepciones alternativas previas, y el 5% restante ponen de manifiesto otras ideas erróneas distintas a las que plasmaron en el cuestionario inicial. Esto da idea de la persistencia de las ideas previas y la necesidad de analizarlas detenidamente para favorecer el conocimiento didáctico del contenido y, con ello, la mejora del proceso de enseñanza-aprendizaje. En todo caso, muchos alumnos no están acostumbrados a evaluaciones de este tipo, y se concentran más en las propias correcciones realizadas en su dibujo o esquema, por el profesor, que en los razonamientos que se intercambian en la puesta en común de los resultados.

## Conclusiones

Las conclusiones principales del estudio llevado a cabo, durante tres cursos académicos, sobre la interpretación, a nivel atómico-molecular, del enlace de hidrógeno en el agua líquida, en alumnos de Grado en Ingeniería Química y de Máster de Formación del Profesorado, se resumen en las siguientes ideas:

- Cuestionar la interpretación de los alumnos sobre fenómenos fisicoquímicos a nivel atómico-molecular resulta de gran interés para el conocimiento didáctico del

contenido (PCK) y la mejora del proceso de enseñanza-aprendizaje por parte del profesorado.

- Solicitar a los alumnos que realicen esquemas o dibujos para explicar sus ideas facilita la identificación de sus concepciones alternativas. Cada vez más, en todas las etapas educativas, se otorga mucha importancia a la visualización de figuras, simulaciones y vídeos, fácilmente accesibles por internet, pero casi siempre desde una participación pasiva en el alumnado, por lo que el fomento de su implicación activa es fundamental.
- No hay diferencias significativas entre las respuestas de los alumnos que cursan las titulaciones citadas, salvo que los del Máster de Formación del Profesorado presentan más frecuentemente que los de Grado en Ingeniería Química, dibujos explicativos con cierta intención didáctica.
- El 48% de los alumnos fue capaz de razonar aceptablemente la interpretación, a nivel atómico-molecular, del enlace de hidrógeno en el caso propuesto (agua líquida).
- La mayor parte de las concepciones alternativas, que conllevan errores conceptuales, se refieren a considerar la formación de enlaces entre átomos de H de distintas moléculas de  $H_2O$  (15% de los alumnos) o los enlaces covalentes O-H de cada molécula individual de  $H_2O$  (13% de los alumnos).
- Otras concepciones alternativas (24% de los alumnos) se refieren a aspectos como: considerar que se une cada H a dos O por enlaces covalentes, formando cadenas del tipo -H-O-H-O-H-; formas moleculares extravagantes; o la interpretación de una estequiometría equivocada para el agua, entre otros más puntuales.
- La reiteración del enlace de hidrógeno, por cuestiones didácticas, como uno de los últimos ejemplos que se exponen en las aulas y en los libros de texto en las distintas etapas educativas, junto con el enlace metálico, hace que los alumnos asimilen mejor el fundamento de los tipos de enlace sobre los que se hace más énfasis: el covalente y el iónico.
- Al cabo de un mes, aproximadamente, de razonar y discutir en el aula las ideas plasmadas en los cuestionarios, aumenta el porcentaje de alumnos que comprenden el fenómeno a nivel microscópico, pero cerca de un 20% persiste en sus concepciones alternativas o cambian a otras también erróneas.

Los resultados alcanzados, y la experiencia acumulada, permite recomendar este tipo de estrategias para el profesorado de las diferentes etapas educativas: con el empleo de poco tiempo (unos 10 minutos de clase) se obtiene una información que favorece el mejor conocimiento del pensamiento de los alumnos sobre algún concepto concreto, lo que redundará, con seguridad, en replanteamientos del proceso de enseñanza-aprendizaje por parte del profesor.

## Agradecimientos

Se agradece la ayuda recibida por la Comunidad de Madrid, a través del Convenio Plurianual con la Universidad Politécnica de Madrid, dentro de la línea de actuación «Programa de Excelencia para el Profesorado Universitario», en el marco del V Plan Regional de Investigación Científica e Innovación Tecnológica, PRICIT.

## Bibliografía

- Ballester Pérez, J. R.; Ballester Pérez, M. E.; Calatayud, M. L.; García-Lopera, R.; Sabater Montesinos, J. V. y Trilles Gil, E. (2017). Student's misconceptions on chemical bonding: A comparative study between High School and first year University students. *Asian Journal of Education and e-Learning*, 5 (1), 1-15. Disponible en <https://bit.ly/40vUk4p> [fecha de acceso: 7 de febrero de 2023].
- Breslyn, W. (2019). Hydrogen Bonding in Water. <https://bit.ly/3Yae3ot> [fecha de acceso: 7 de febrero de 2023].
- Caamaño, A. (2016). Un enfoque para vencer errores y ambigüedades: Enlace químico y estructura de las sustancias en secundaria. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 86, 8-18. Disponible en <https://bit.ly/40DL12s> [fecha de acceso: 7 de febrero de 2023].
- Fries-Gaither, J. (2008). Questioning techniques: research-based strategies for teachers. The Ohio State University.
- Furió, C. y Furió, C. (2000). Dificultades conceptuales y epistemológicas en el aprendizaje de los procesos químicos. *Educación Química*, 11(3), 300-308. DOI: <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2000.3.66442>
- Furió, C.; Solbes, J. y Carrascosa, J. (2006). Las ideas alternativas sobre conceptos científicos: tres décadas de investigación. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 48, 64-77. Disponible en <https://bit.ly/3lbb8xb> [fecha de acceso: 7 de febrero de 2023].
- Giraldo Toro, M. T.; Cañada Cañada, F.; Dávila Acedo, M. A. y Melo Niño, L. V. (2015). Ideas alternativas de los alumnos de secundaria sobre las propiedades físicas y químicas del agua. *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*, 37, 51-70. DOI: <https://doi.org/10.17227/01213814.37ted63.75>
- Goalby, N. (2023). How to teach intermolecular forces at 14-16, *Education in Chemistry*. Disponible en <https://rsc.li/3Ic6nN0> [fecha de acceso: 7 de febrero de 2023].
- Gültepe, N. (2021). Scientific argumentation in teaching hydrogen bond, *Science Education International*, 32(3), 197-208. Accesible en <https://bit.ly/3jLyhpD> [fecha de acceso: 7 de febrero de 2023].
- Härmälä-Braskén, A. S.; Hemmi, K. y Kurtén, B. (2020). Misconceptions in chemistry among Finnish prospective primary school teachers—a long-term study. *International Journal of Science Education*, 42(9), 1447-1464. DOI: <https://doi.org/10.1080/09500693.2020.1765046>

- Larkin, D. (2012). Misconceptions about “misconceptions”: Preservice secondary Science teachers’ views on the value and role of student ideas. *Science Education*, 96(5), 927-959. DOI: <https://doi.org/10.1002/sce.21022>
- Marcén, C. y Cuadrat, J. (2012). Argumentos educativos para enseñar-aprender el agua en la enseñanza obligatoria. *Serie Geográfica*, 18, 65-75. Disponible en <https://bit.ly/3I68imo> [fecha de acceso: 7 de febrero de 2023].
- Martín del Pozo, R.; Rivero, A. y Azcárate, P. (2014). Las concepciones de los futuros maestros sobre la naturaleza, cambio y utilización didáctica de las ideas de los alumnos. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 11(3), 348-363. DOI: [http://dx.doi.org/10.25267/Rev\\_Eureka\\_ensen\\_divulg\\_cienc.2014.v11.i3.06](http://dx.doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2014.v11.i3.06)
- Martín Sánchez, M.; Martín Sánchez, M. T.; Sotres, F.; Paz, I., y Pinto, G. (2015). Reacción entre el sodio y el agua: una demostración experimental para ilustrar fenómenos físicos y químicos. *Revista Española de Física*, 29(2), 33-40.
- Meltafina, M.; Wiji, W. y Mulyani, S. (2019). Misconceptions and threshold concepts in chemical bonding. *International Conference on Mathematics and Science Education (ICMScE 2018). Journal of Physics: Conf. Series*, 1157 (2019) 042030. [10.1088/1742-6596/1157/4/042030](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1157/4/042030)
- Özmen, H. (2004). Some student misconceptions in Chemistry: A literature review of chemical bonding. *Journal of Science Education and Technology*, 13(2), 147-159. Disponible en <https://www.jstor.org/stable/40188778> [fecha de acceso: 1 de febrero de 2023].
- Quílez, J.; Lorente, S.; Sendra, F. y Enciso, E. (2009). Afinidad (Química) 2º de Bachillerato. Editorial ECIR, Paterna (Valencia, España), pp. 136-138.
- Ramos, R.; Praia, J.; Marqués, L. y Gama Pereira, L. (2001). Ideas alternativas sobre el ciclo litológico en alumnos portugueses de enseñanza secundaria. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 93, 252-260.
- Smith, K. C. y Villarreal, S. (2015). Using animations in identifying general chemistry students’ misconceptions and evaluating their knowledge transfer relating to particle position in physical changes. *Chemistry Education Research and Practice*, 16(2), 273-282. DOI: <https://doi.org/10.1039/C4RP00229F>