



Química a microescala en la enseñanza experimental usando una microbalanza de cristal de cuarzo

Microscale chemistry in experimental teaching using a quartz crystal microbalance

Julio David Gonzales-Balladares¹ y Evelyn Toque-Huaman¹

Recepción: 26/12/21
Aceptación: 13/08/22

Resumen

Este estudio propone una práctica de laboratorio a nivel universitario que permite la participación activa y ayuda a la comprensión de los conceptos de propiedades físico-químicas y estructuras moleculares con la experimentación como estrategia de enseñanza-aprendizaje de la química a microescala. Para ello se utiliza una microbalanza de cristal de cuarzo para detectar variaciones de pequeñas cantidades de masa. La microbalanza se construye con componentes electrónicos de bajo costo, una placa de Arduino UNO, y una pantalla OLED para determinar el tiempo de evaporación a temperatura ambiente de sustancias puras y mezclas con distintos grados de volatilidad: Propan-2-ol, etanol y agua. Y conseguir con su uso disminuir el costo en los reactivos químicos empleados, la cantidad de desechos generados, y reducir el tiempo en los experimentos para permitir una mayor participación en el debate y la discusión entre estudiantes y profesores durante la práctica.

Palabras clave

Arduino, enseñanza experimental, microbalanza, participación activa, QCM, química a microescala.

Abstract

This study proposes a laboratory practice at the university level that allows active participation and helps understand the concepts of physical-chemical properties and molecular structures with experimentation as a teaching-learning strategy for microscale chemistry. For it, a quartz crystal microbalance is used to detect variations of small amounts of mass. The microbalance is built with low-cost electronic components, an Arduino UNO board, and an OLED screen to determine the evaporation time at room temperature of pure substances and mixtures with different degrees of volatility: Propan-2-ol, ethanol, and water. And with its use, reduce the cost of the chemical reagents used, the amount of waste generated, and reduce the time in the experiments to allow greater participation in the debate and discussion between students and teachers during practice.

Keywords

Arduino, active participation, experimental teaching, microbalance, microscale chemistry, QCM.

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Perú.

Introducción

Las asignaturas universitarias relacionadas a química tienen un papel importante en las ciencias básicas al suministrar conocimientos y desarrollar habilidades práctico-experimentales en los estudiantes (Bello, 2018, Hernández-Millán, 2012 y García-Argüelles, *et al.*, 2018), habilidades como; el conocimiento, la comprensión, y la aplicación (Bloom y Krathwohl, 1956). Por esta razón, la enseñanza experimental debe ser activa, metodológica, y diseñada para que los alumnos aprendan a aplicar sus conocimientos, ampliando sus habilidades para resolver problemas por la vía experimental (Ramírez-Silva y Rojas-Hernández, 2012). Siendo la participación activa aquella en la que el estudiante muestra su voluntad e interés en las cuestiones que afectan su educación (Pasek, *et al.*, 2015), y se caracterice por una participación espontánea o voluntaria durante el desarrollo de la clase (Guamán, *et al.*, 2021).

La enseñanza experimental en el proceso formativo y educativo, debe cuestionar los métodos tradicionales en favor de una cultura de conciencia ambiental y de racionalidad en la utilización de los recursos. Por ello, es necesario la aplicación de la química a microescala en los laboratorios en los niveles medio-superior y superior (Ibáñez, 2000).

La química a microescala es un movimiento que surgió en distintos lugares del mundo, consiste en hacer más con menos en los laboratorios de enseñanza, y ha demostrado su gran utilidad en la práctica experimental sobre todo en los cursos de química (Mayo, *et al.*, 1999), desarrollándose desde antes del año 2000 en Latinoamérica (Ibáñez, 2005). Sin embargo la enseñanza experimental a microescala no ha crecido rápidamente debido a los altos costos en los equipos de instrumentación que trabajan con cantidades de muestras pequeñas (miligramos y microlitros) que restringen su uso a la investigación formal (López-Cerdeña, *et al.*, 2005). Por este motivo, las microbalanzas de bajo costo son una alternativa para solucionar este problema.

Las microbalanzas de cristal de cuarzo conocidas también como QCM por sus siglas en inglés (*Quartz Crystal Microbalance*) son equipos instrumentales usados en distintas investigaciones para medir pequeñas cantidades de masa (Arnau, 2008 y Alassi, 2017) Las QCM son capaces de determinar valores de masa menores a microgramos (μg) y valores de concentración menores a partes por millón (ppm). Utilizan las propiedades piezoeléctricas de los cristales resonadores en circuitos osciladores que detectan pequeños cambios en la frecuencia de resonancia (Δf) proporcionados por el cambio de masa depositadas en la superficie del cristal (Δm). Esta relación se expresa en la ecuación de Sauerbrey (Ver Ec. 1), donde C_f es una constante denominada factor de sensibilidad del cristal (Sauerbrey, 1959 y Flores-Flores, *et al.*, 2010).

$$\Delta f = -C_f \Delta m \quad (1)$$

En la actualidad muchos investigadores han desarrollado distintas QCM logrando reducir su costo y volviéndolas más accesibles (Flores-Flores, *et al.*, 2010). Ejemplo de ello son la microbalanzas que usan placas de desarrollo como: el Arduino Mega (Wei, 2016), Arduino Micro en el módulo OpenQCM (Mista, *et al.*, 2016, y Muckley, *et al.*, 2016), Arduino Due (Trisna, *et al.*, 2020) y Raspberry Pi (Suzuki, *et al.*, 2020). Otros investigadores utilizaron las QCM para clasificar alcoholes con diferentes estructuras moleculares (Adak, *et al.*, 2020), logrando diferenciar distintos compuestos orgánicos volátiles (VOC_s) como el etanol y el propan-2-ol (Thriumani, *et al.*, 2018 y Su, *et al.*, 2020).

Los VOC_s son compuestos con estructuras moleculares que hacen posible que se evaporen a condiciones atmosféricas interiores de temperatura (-1 a 32 °C), y presión (cercas a 1 atm). Estos compuestos por ser tan volátiles son difíciles de medir y se encuentran casi en su totalidad como gases en el aire. Debido a que su volatilidad es mayor cuanto menor es su temperatura de ebullición los VOC_s suelen clasificarse por sus puntos de ebullición (EPA, 2022). Siendo, la volatilidad la tendencia de una sustancia a vaporizarse o la velocidad a la que se vaporizan, y está relacionada con su presión de vapor. Este concepto de volatilidad junto con el de evaporación, presión de vapor y ebullición son consideradas definiciones básicas en el área de fisicoquímica y se aplican en el diseño de procesos químicos, pero algunas veces son comprendidos inadecuadamente por los estudiantes, como la definición de presión de vapor que es confundida con la presión atmosférica (Obaya, *et al.*, 2008), siendo su definición correcta, la presión que ejerce el vapor de un líquido sobre este cuando está en equilibrio a una temperatura dada. Mientras, la evaporación es un fenómeno en el que las moléculas ubicadas en la superficie del líquido, al no estar contenidas por suficiente presión del líquido se escapan por los alrededores como vapor. A diferencia, la ebullición es el proceso en el que las moléculas en cualquier parte del líquido logran escapar, inclusive formando burbujas en el interior del líquido.

La novedad en nuestro estudio es la aplicación de la química a micro escala en la enseñanza experimental usando una microbalanza de cristal de cuarzo, empleando como estrategia de enseñanza-aprendizaje a la experimentación. Proponiendo una práctica de laboratorio a nivel universitario que permite la participación activa en los estudiantes, refuerza los conocimientos de propiedades físico-químicas y estructuras moleculares, y desarrolla la comprensión al interpretar y comparar las gráficas obtenidas por la QCM.

Las experiencias que se proponen están basadas en los principios de la guía didáctica de profesores de química I (Martínez, *et al.*, 2009). La práctica de laboratorio se puede aplicar en los cursos de química general, fisicoquímica, química analítica, etc. Y tiene como objetivos que los estudiantes expliquen sobre la evaporación de compuestos volátiles, desarrollando sus habilidades cognitivas, y procedimentales. La actividad es organizada en equipos e inicia con una pregunta generadora, la actividad experimental se desarrolla con ayuda de la QCM, los datos obtenidos son analizados, y expuestos por cada grupo. Como actividad de cierre el docente refuerza los conceptos, y guía a los estudiantes en un debate hasta conseguir el aprendizaje deseado. Finalmente, cada equipo elabora un reporte para su evaluación con los hallazgos obtenidos.

Materiales y método

Diseño del Equipo

La QCM tiene un costo de 20.0 USD, y requiere de: Dos osciladores activos de cristal de cuarzo (OSC DIP-4) de 10 MHz, dos condensadores 104, un circuito integrado 74HC74, una placa Arduino UNO, 2 tiras de 20 pines, una placa impresa de 9 x 7 cm. y una pantalla OLED SSH1106, ensamblados como se muestra en la Figura 1, previo retiro de la cobertura metálica a uno de los osciladores (OSC DIP-4).

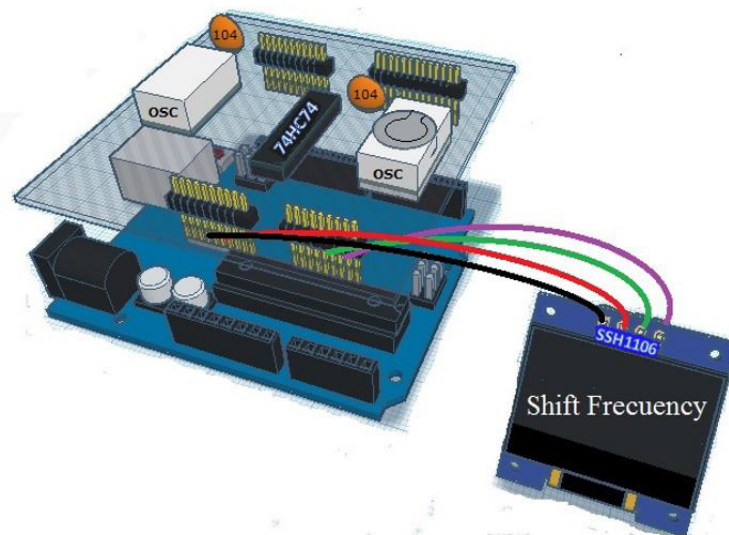


FIGURA 1. Vista de la microbalanza con osciladores activos de cristal de cuarzo con pantalla OLED para la enseñanza.

El software usado para recolectar Δf fue un sketch para usar el pin 5 del Arduino UNO como contador de frecuencias usando la librería FreqCount. Y para visualizar Δf en una pantalla OLED fue necesario usar la librería U8glib.h. Finalmente para almacenar la información procedente del Arduino UNO se usó un programa en Python importando el módulo serial. Todos los datos que respaldan los hallazgos de este estudio, sketches de Arduino, script en Python están disponibles abiertamente en Mendeley Data. doi: [10.17632/hbdcwctm87.1](https://doi.org/10.17632/hbdcwctm87.1)

Reactivos

Se usó agua destilada, etanol al 96% de pureza y propan-2-ol al 100% de pureza. Sus estructuras moleculares se muestran en la Figura 2. Las esferas de color negro representan los carbonos, las esferas de color negro a los hidrógenos y finalmente las esferas de color rojo a los oxígenos presentes en la molécula.

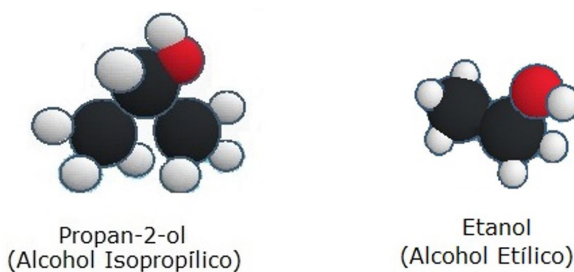


FIGURA 2. Estructura molecular de los alcoholes usados en la QCM.

Procedimiento

Se plantearon dos experiencias en trabajo colaborativo para ser realizado por cuatro estudiantes; a cada grupo se les asignó de manera aleatoria una de las experiencias, luego del desarrollo del experimento, los grupos expusieron sus resultados obtenidos (tablas y graficas), y realizaron preguntas entre grupos. Posteriormente el docente brindó la retroalimentación, y guió el debate hasta conseguir el aprendizaje deseado.

La experiencia 1, tuvo un tiempo de realización de 1 hora; donde se colocaron distintos volúmenes de propan-2-ol (3; 5; 8; 10 μL) en el cristal del resonador para hallar el tiempo de evaporación (t) en cada muestra. Luego con los conceptos de propiedades físico-químicas y estructuras moleculares los estudiantes respondieron a la pregunta ¿Por qué al aumentar el volumen (3; 5; 8; 10 μL) de la muestra aumento el tiempo de evaporación?

La experiencia 2, tuvo un tiempo de realización de 1 hora; donde se colocó 1 μL de muestra con distintas concentraciones de etanol-agua (96; 90; 85; 80%) en el cristal del resonador para hallar t en cada muestra. Luego con los conceptos de propiedades físico-químicas y estructuras moleculares los estudiantes respondieron a la pregunta ¿Por qué al disminuir la concentración de etanol (96; 90; 85; 80%) en una muestra con volumen de 1 μL aumento el tiempo de evaporación?

Este estudio también realizó la evaluación de precisión en la QCM para validar su funcionamiento por tratarse de un equipo diseñado para la enseñanza y no de un equipo comercial. Para ello se colocó en el cristal del resonador una muestra de 1 μL de propan-2-ol por un tiempo de 200 segundos (s), repitiéndose la prueba tres veces en tres días distintos. Mediante la prueba ANOVA al 95% de confiabilidad, se evaluó la semejanza del tiempo de evaporación. Así mismo, se determinó su desviación estándar relativa de repetibilidad (RSD_r) y de reproducibilidad (RSD_R).

Resultados y discusión

En los debates posteriores a la exposiciones de cada grupo se consigue una participación activa y mayor interacción entre estudiantes (Ferrer-Roca y Cross, 2004), logrado en gran parte por la reducción en el tiempo de la practica experimental por el uso de la QCM, acercando la teoría con la práctica al tener que usar conceptos teóricos para comprender sus propios resultados experimentales (Taber, 2015 y Pozuelo, 2021).

Experiencia 1

Al aumentar el volumen de la muestra (3; 5; 8; 10 μL) en la QCM, se obtuvo un aumento en el tiempo de evaporación como se observa en la Tabla 1 y Figura 3. Esto se debe porque al aumentar el volumen también se está aumentando su masa. Esta es una propiedad intensiva de la materia dada por la relación masa y volumen (Santos y Fuertes, 2004). Otros estudios, modelaron matemáticamente y realizaron pruebas experimentales en una gota de propan-2-ol coloidal de 38 nL, y obtuvieron un tiempo de evaporación menor a 20 segundos (Bhardwaj, *et al.*, 2009), lo que comprueba que al aumentar la cantidad de propan-2-ol se requiere de mayor tiempo para poder vaporizarse todas las moléculas presentes en la muestra.

Volumen (μL)	t^* (s)
3	251 \pm 14
5	391 \pm 4
8	590 \pm 4
10	714 \pm 14

*Valor promedio (n=3)

TABLA 1. Tiempo de evaporación obtenido por la QCM para el Propan-2-ol.

La Figura 3 fue obtenida en condiciones ambientales de temperatura de 23.2 ± 0.1 °C y humedad relativa (HR) de $66 \pm 0.4\%$. Entre las razones por las que el propan-2-ol cambio del estado líquido al estado gaseoso a temperatura menor que su temperatura de ebullición (83 °C) se debe al proceso de evaporación y al alto grado de volatilidad que poseen los VOC_s, relacionada por su alta presión de vapor (0.06 atm) (EPA, 2022), y por las fuerzas intermoleculares, que son las interacciones que existen entre las moléculas en base a los elementos que conforman su estructura molecular, Ver Figura 2.

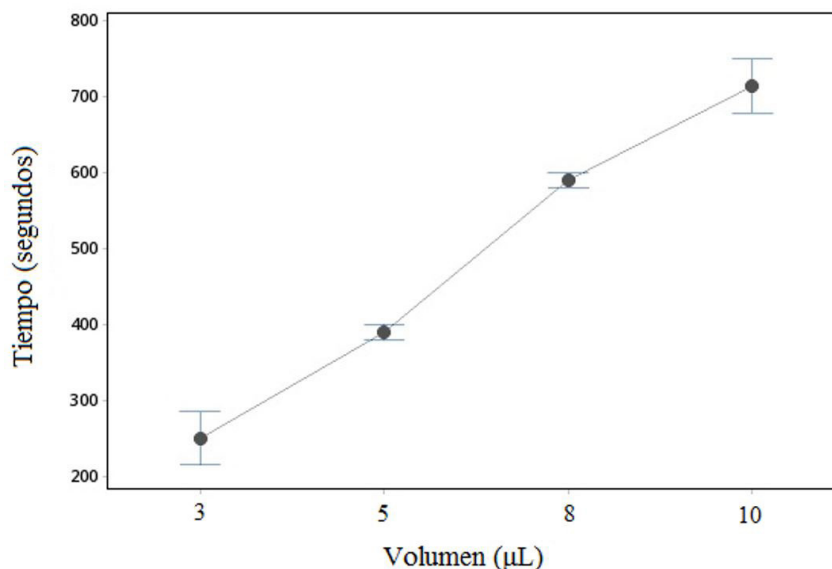


FIGURA 3. Vista de la variación del tiempo de evaporación en distintas muestras de propan-2-ol.

Experiencia 2

Al disminuir la concentración de etanol (96; 90; 85; 80%) en la QCM, se obtuvo un aumento en el tiempo de evaporación. Ver la Tabla 2 y Figura 4. La razón de la evaporación se debe a que el etanol posee una presión de vapor alta (0.07 atm) por pertenecer a los VOC_s, y estos se vaporizan con mayor facilidad en comparación de sustancias con presiones de vapor más bajas (EPA, 2022), como el agua que posee una presión de vapor de 0.03 atm, y además debido a su estructura molecular (Ver Figura 2), posee mayores fuerzas intermoleculares que el etanol. Por esta razón, al tener mayor cantidad de agua en la mezcla aumenta el tiempo de evaporación.

Etanol (%Volumen)	t* (s)
96	187 ± 32
90	233 ± 30
85	271 ± 13
80	523 ± 46

*Valor promedio (n=3)

TABLA 2. Tiempo de evaporación obtenido por la QCM para la mezcla etanol-agua.

La Figura 4 fue obtenida en condiciones ambientales de temperatura de 23.4 ± 0.3 °C y HR de $69 \pm 0.5\%$. Y se aprecia el aumento del tiempo de evaporación al disminuir la concentración de etanol. Estos resultados están relacionados también con temas de equilibrio liquido-vapor, mezclas de sustancias, y aplicación de la ley de Raoult que son vistos a profundidad en los

cursos de fisicoquímica, y pueden ayudar a la comprensión de temas complejos como en casos de mezclas azeotrópicas. Definidas comúnmente como una mezcla líquida de dos o más componentes que poseen un único punto de ebullición constante, que al pasar al estado de vapor se comportan como un líquido con un solo componente.

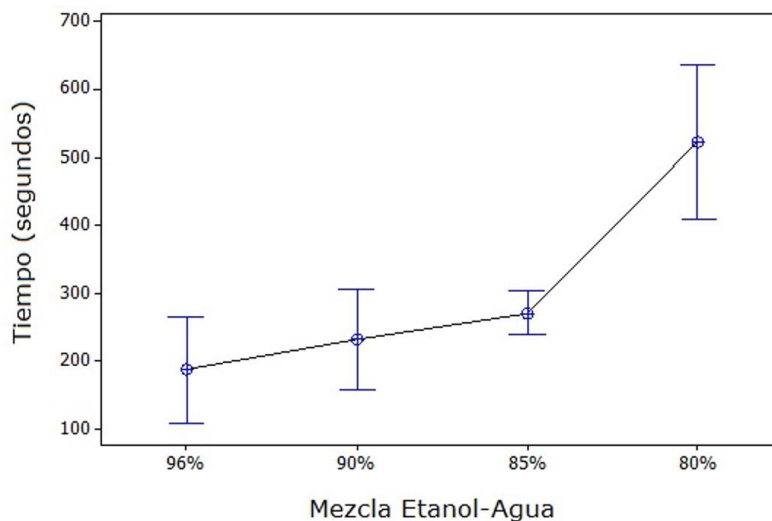


FIGURA 4. Vista del tiempo de evaporación en una mezcla etanol-agua utilizando una QCM.

Otros estudios utilizando técnicas ópticas confirman los valores obtenidos por la QCM obteniendo un aumento en el tiempo de evaporación de 200 a 900 segundos al disminuir la concentración de etanol de 100% a 0% en agua (Sefiane *et al.*, 2003). Este aumento en el tiempo de evaporación también ocurrió en mezclas de metanol con agua (Liu *et al.*, 2008), en mezclas de propan-1-ol con agua (Huang *et al.*, 2020), y en mezclas de propan-2-ol con agua (Xu *et al.*, 2012).

Precisión

La muestra de 1 μL de propan-2-ol fue analizada por la QCM tres veces (Figura 5), en tres días distintos con condiciones ambientales de temperatura de 21.7 ± 0.2 °C y HR de $67 \pm 0.5\%$, obteniéndose valores negativos de variación de frecuencia de resonancia (Δf) cumpliendo con la ecuación Sauerbrey (Ver Ecuación 1). Mientras Wei con su QCM realizó la prueba de evaporación con cinco gotas de etanol (Wei, 2016), obteniendo un comportamiento similar a la Figura 5.

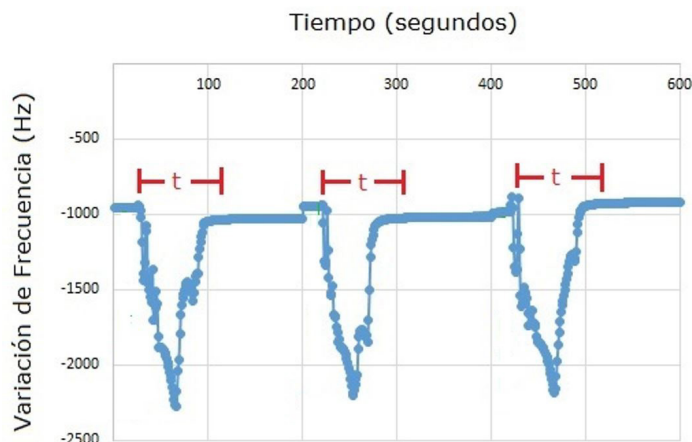


FIGURA 5. Vista de la prueba de repetibilidad con la QCM para un 1 μL de propan-2-ol.

Para las muestras de 1 μL de propan-2-ol se determinó un tiempo promedio de evaporación de 101 segundos con un RSD_r de 6.1, y un RSD_R de 12.1 segundos. Con la prueba ANOVA se determinó que existe diferencia en el tiempo de evaporación de 6 segundos con un nivel de confianza del 95% (Ver Tabla 3). Mientras Xu *et al.*, en su estudio utilizando dispositivos ópticos de alta precisión (Dataphysics OCAH 230) en una gota de 2 μL que contenía 34% de propan-2-ol obtuvo un tiempo de evaporación de 600 segundos en un ambiente con HR de 40% (Xu *et al.*, 2012). Este valor es mayor a los resultados obtenidos en la Tabla 3 debido a que su muestra poseía una mayor cantidad de volumen.

Día	t^* (s)
1	113 \pm 6
2	97 \pm 5
3	92 \pm 1
*Valor promedio (n=3)	

TABLA 3. Resultados obtenidos por la QCM en la prueba de precisión.

Conclusiones

El uso de una QCM en el laboratorio acerca la teoría con la práctica y mediante la experimentación como estrategia de enseñanza-aprendizaje permite reforzar los conceptos de propiedades físico-químicas y estructuras moleculares en clases, reduce el costo en los reactivos químicos usados, la cantidad de desechos generados, y la duración de la práctica, permitiendo un mayor tiempo para el debate entre los estudiantes y sus profesores. Fortaleciendo la enseñanza experimental de química a microescala en favor de una mayor participación activa en el estudiante.

Referencias

- Adak, M. F., Lieberzeit, P., Jarujamrus, P., & Yumusak, N. (2020). Clasificación de alcoholes obtenidos mediante sensores QCM de diferentes características utilizando una red neuronal basada en ABC. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(3), 463–469. <https://doi.org/10.1016/j.JESTCH.2019.06.011>
- Alassi, A., Benammar, M., & Brett, D. (2017). Sistemas de interfaz electrónica de microbalanza de cristal de cuarzo: Una revisión. *Sensors*, 17 (12), 2799. <https://doi.org/10.3390/S17122799>
- Arnau, A. (2008). Una revisión de los sistemas electrónicos de interfaz para aplicaciones de microbalanzas de cristal de cuarzo de corte AT en líquidos. *Sensors*, 8(1), 370–411. <https://doi.org/10.3390/S8010370>
- Bhardwaj, R., Fang, X., & Attinger, D (2009). Formación de patrones durante la evaporación de una gota de nanolitro coloidal: un estudio numérico y experimental. *New Journal of Physics* 11, 33. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/11/7/075020>
- Bello, L. (2018). La enseñanza de la química general y su vínculo con la vida. *Educación Química*, 11(4), 374–380. <https://doi.org/10.22201/FQ.18708404E.2000.4.66430>

- Bloom, B., & Krathwohl, D. (1956). *Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals. Handbook I: Cognitive domain*. Nueva York, USA: Longmans, Green.
- EPA. (2022). *Resumen técnico de los compuestos orgánicos volátiles*. Consultada en Junio 19, 2022, en la URL <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatile-organic-compounds>
- Ferrer-Roca, C., & Cros S., A. (2004). La física en el bolsillo: experimentos sencillos de electricidad. *Alambique*, 39, 79-85. <https://redined.educacion.gob.es/xmlui/handle/11162/21518>
- Flores-Flores, E., Flores-Mena, J. E., Castillo, M. M., Arias, E. M. G., Mendoza Álvarez, M. E., & Alcántara Iniesta, S. (2010). Construcción y caracterización eléctrica de una microbalanza con $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$. *Superficies y Vacío*, 23, 153-160. <https://www.redalyc.org/pdf/942/94248264031.pdf>
- García-Argüelles, L., López-Medina, F., Moreno-Toiran, G., & Ortigosa-Garcell, C. (2018). El método experimental profesional en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la química general para los estudiantes de la carrera de ingeniería mecánica. *Revista Cubana de Química*, 30(2), 328-345.
- Guamán P, E. P. (2021). La motivación en las clases online y la participación activa de los niños de 4 a 5 años de Educación Inicial. Proyecto de investigación para el título de licenciada en ciencias de la educación inicial. Universidad técnica de Ambato. Consultada en abril 18, 2022, en la URL <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/32672>
- Hernández-Millán G. (2012). Enseñanza experimental ¿Cómo y para qué? *Educación Química*, 23(1), 92-95. [http://dx.doi.org/10.1016/S0187-893X\(17\)30139-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0187-893X(17)30139-8)
- Huang, X., Wang, J., Wang, Y., Qiao, X., Ju, D., Sun, C., & Zhang, Q. (2020). Estudio experimental sobre evaporación y microexplosión características de la gota mezclada de biodiesel/n-propanol. *Energy*, 205, 118031. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118031>
- Ibáñez J. G. (2000). La química en microescala en México. Hacia una panorámica general. *Educación Química*, 11(1), 168-171. <https://doi.org/10.22201/FQ.18708404E.2000.1.66476>
- Ibáñez, J. G. (2005). Química a microescala en américa latina. *Universitas Scientiarum*, 10, 79-83, consultada en abril 18, 2022, en la URL <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/scientarium/article/view/5019/3869>
- Liu, C., Bonaccorso, E., & Butt, H-J. (2008). Evaporación de gotas sésiles de agua/etanol en un ambiente controlado. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 10, 7150-7157, <https://doi.org/10.1039/b808258h>
- López-Cerdeña, K., García-Mendoza, A., Santiago, A. D., & Baeza, A. (2005). Química analítica a microescala total: Microconductimetría. *Revista Cubana de Química*, 17(1), 19.
- Martínez S.G., García, M. P., Rivera, M. C., Quiza, B. E., Chávez G., & Garduño, J. (2009). Guía didáctica para el profesor de química I, Escuela nacional colegio de ciencias y humanidades, consultada en abril 18, 2022, en la URL <https://www.unamenlinea.unam.mx/recurso/82310-guia-didactica-para-el-profesor-de-quimica-i>

- Mayo, D., Singh, M., Pike, R., & Szafran, Z. (1999). Una gran revolución en el laboratorio de química. *Educación Química*, 10(2), 102-106. <https://doi.org/10.22201/FQ.18708404E.1999.2.66492>
- Mista, C., Zalazar, M., Pealva, A., Martina, M., & Reta, J. M. (2016). Microbalanza de cristal de cuarzo con control de disipación. *Journal of Physics: Conference Series*, 705(1), 012008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/705/1/012008>
- Muckley, E. S., Anazagasty, C., Jacobs, C. B., Hianik, T., & Ivanov, I. N. (2016). Matriz de microbalanzas de cristal de cuarzo escalable de bajo costo para detección ambiental. *Proc. SPIE 9944, Sensores orgánicos y bioelectrónica IX*, 99440Y9944, 75-82. <https://doi.org/10.1117/12.2237942>
- Obaya, A., Vargas, Y. M., & Delgadillo, G. (2008). Estudio exploratorio sobre la comprensión de los conceptos de evaporación, condensación y presión de vapor en estudiantes universitarios. *Educación. Química*, 19(2), 108-113.
- Pasek P, E., Ávila V, N., & Matos R, Y. (2015). Concepciones sobre participación social que poseen los actores educativos y sus implicaciones. *Paradigma*, 36(2), 99-121.
- Pozuelo J. (2021). Aprendiendo reacciones químicas en tiempos de pandemia. *Educación Química*, 32(4), 74-79. <http://dx.doi.org/10.22201/fq.18708404e.2021.5.79934>
- Ramírez-Silva, M. T., & Rojas-Hernández, A. (2012). La enseñanza experimental de la química general y la química analítica desde la ENEP-Cuautitlán de la UNAM y la UAM-Iztapalapa en el último cuarto del siglo XX. *Educación Química*, 23(1), 136-140. [http://dx.doi.org/10.1016/S0187-893X\(17\)30145-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0187-893X(17)30145-3)
- Sauerbrey, G. (1959). Uso de cristales de cuarzo para pesar capas delgadas y micro pesas. *Revista de Física*, 155(2), 206-222. <https://doi.org/10.1007/BF01337937>
- Santos, J. D., & Fuertes, J. F. (2004). La densidad es una propiedad intensiva de la materia (pero su medida no). *Revista Mexicana de Física*, 50(2), 81-87.
- Sefiane, K., Tadrist, L., & Douglas, M. (2003). Estudio experimental de la gota sésil de la mezcla agua-etanol en evaporación: influencia de la concentración. *Revista internacional de transferencia de calor y masa*, 46(23), 4527-4534 [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00267-9](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00267-9)
- Su, X., Chen, D., Li, N., Stevenson, A. C., Li, G., & Hu, R. (2020). Un QCM-D inalámbrico sin electrodos en modo de resonancia múltiple para la discriminación de compuestos orgánicos volátiles. *Sensors and Actuators A: Physical*, 305, 111938. <https://doi.org/10.1016/j.SNA.2020.111938>
- Suzuki, R., Emura, T., Tokura, Y., Kawamura, N., & Hori, Y. (2020). Una plataforma de detección de gas portátil basada en microbalanzas de cristal de cuarzo para el monitoreo de la respiración humana a pedido. *IEEE Access*, 8, 146166-146171. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3013857>
- Taber, K.S. (2015). El papel del trabajo “práctico” en la enseñanza y el aprendizaje de la química. *School Science Review*, 96(356), 75-83, consultada en abril 18, 2022, en la URL <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5280254>

- Thriumani, R., Zakaria, A., Omar, M. I., & Halim, F. A. B. (2018). Un estudio inicial sobre el sensor de gas basado en QCM recubierto de óxido de grafeno para la aplicación de detección de volátiles relacionados con el cáncer. *Recent Innovations in Chemical Engineering*, 11(1), 29–39. <https://doi.org/10.2174/2405520411666180219152530>
- Trisna, J., Nur, S., Rianjanu, A., Budi, A., Suryo, H., & Triyana, K. (2020). Sistema de nariz electrónico móvil inteligente que comprende una matriz de sensores de microbalanza de cristal de cuarzo con funcionalidad de polímero híbrido. *ACS Omega*, 5(45), 29492–29503. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04433>
- Wei, D. (2016). Plataforma de sistema de microbalanza de cristal de cuarzo de bajo costo diseñada para nanopartículas químicas. Tesis de Maestría y especialidad en proyectos. Western Kentucky University. <https://digitalcommons.wku.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2639&context=theses>
- Xu, W., Smeers, J., Vereecke, G. & Struyf, H. (2012). Investigación del mecanismo de evaporación y humectación de mezclas IPA-DIW. *Solid State Phenomena*, 195, 223-226. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.195.223>