

Detección de metales en agua a través de teléfonos inteligentes

ASTRID HERNÁNDEZ CRUZ¹, HISILA SANTACRUZ ORTEGA²

RESUMEN

El interés por instrumentos analíticos portables que permitan la detección de metales al alcance de más usuarios ha crecido en los últimos años. Los teléfonos inteligentes se han convertido en laboratorios portátiles. La Química Analítica encontró en los teléfonos una oportunidad para detectar y cuantificar diferentes analitos en tiempo y espacio real sin la necesidad de realizar análisis en el laboratorio (un ejemplo es la detección colorimétrica de metales en agua). En este artículo de divulgación se expone el alcance de los teléfonos inteligentes como herramientas para la detección de metales. Además, se plantea un caso de estudio en el que se utilizó una película sensora biodegradable a base de almidón, gelatina y un indicador colorimétrico para la detección de cobre, zinc y níquel.

Palabras clave: metales, contaminación de agua, teléfonos inteligentes, colorimetría

¹Dra. en Medio Ambiente y Desarrollo, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México, astrid.hernandez.cruz@uabc.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0003-0776-5105>.

²Dra. en Ciencia de los Materiales, Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México hisila.santacruz@uson.mx, <https://orcid.org/0000-0002-7123-8791>.

Autor de Correspondencia: Astrid Hernández Cruz; astrid.hernandez.cruz@uabc.edu.mx

Recibido: 28 / 02 / 2023

Aceptado: 18 / 08 / 2023

Publicado: 15 / 12 / 2023

Cómo citar este artículo:

Hernández Cruz, A., & Santacruz Ortega, H. (2023). Detección de metales en agua a través de teléfonos inteligentes. *EPISTEMUS*, 17(35). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i35.299>

Detection of Metals in Water through Smartphones

ABSTRACT

The interest in portable analytical instruments that allow metal detection available to more users has grown recently. Smartphones have become portable laboratories. Analytical chemistry has found in phones an opportunity to detect and quantify different analytes in real time and space without the need of developing laboratory analysis (an example is the colorimetric detection of metals in water). In this article, the scope of smartphones as tools for metal detection is presented. In addition, a case study is presented in which a biodegradable sensing film based on starch, gelatin, and a colorimetric indicator was used to detect copper, zinc, and nickel.

Key words: heavy metals, water pollution, smartphones, colorimetry





Introducción

Los teléfonos celulares se han convertido en una parte fundamental de nuestra vida diaria. Son el primer objeto que muchos de nosotros tomamos al despertar, respondiendo a preguntas como "¿Qué hora es?", "¿Qué nuevos mensajes he recibido?" o "¿Qué está ocurriendo en el mundo?". En México, para el año 2020, el 75.5% de la población ya contaba con un teléfono celular, y de estos, nueve de cada diez eran smartphones [1]. Estos dispositivos han revolucionado nuestras rutinas y la manera en que interactuamos con nuestro entorno. Sin embargo, su utilidad no se limita solo a la comunicación; los smartphones han trascendido en varios campos científicos, transformándose en auténticos laboratorios portátiles capaces de detectar sustancias como glucosa, gases tóxicos y metales. Incluso, se han empleado para el seguimiento de señales neuronales gracias a nano implantes con tecnología Bluetooth. Aunque parezca sacado de una película de ciencia ficción, el desarrollo de estos dispositivos electrónicos avanza a pasos agigantados. Los smartphones, con sus características de universalidad (utilizados por la mayoría de las personas en el mundo), portabilidad y sensibilidad, se convierten en herramientas atractivas para una amplia variedad de aplicaciones, desde pruebas médicas hasta análisis medioambientales y de alimentos [2]. Su versatilidad y facilidad de uso los convierten en herramientas poderosas en la ciencia y la tecnología de detección.

Una de las aplicaciones más estudiadas en los últimos años es el uso de smartphones para la detección colorimétrica de metales [3,4]. Por ejemplo, investigadores como Neethu y su equipo han abordado el grave problema de la contaminación de cuerpos de agua con plomo y mercurio desarrollando sistemas habilitados para smartphones que utilizan nanopartículas de plata (AgNP) para detectar estos dos metales de manera sencilla y por cambio de color [5]. Por otra parte, An-



Liang Zhang ha utilizado estos dispositivos para capturar imágenes y cuantificar la concentración de cobre en agua mediante un algoritmo que detecta el color y lo relaciona con la cantidad del metal [6].

La democratización en el acceso a pruebas y análisis de contaminantes destaca como una de las principales ventajas al emplear smartphones como herramientas complementarias. Dada la prevalencia y amplio uso de estos dispositivos, un gran número de personas puede aprovechar esta tecnología. Este enfoque cobra especial relevancia en áreas geográficas donde los equipos de laboratorio son escasos y costosos, posibilitando un alcance más amplio y accesible para la detección de contaminantes. Además, la incorporación de la sociedad en actividades de monitoreo y observación científica ofrece la oportunidad de generar diversos beneficios en las comunidades que se involucran en estas iniciativas [7]. Esto abarca desde identificar las fuentes de contaminación hasta ayudar a reducir los impactos negativos en el entorno cercano [7]. En este contexto, los sensores colorimétricos, respaldados por el uso de teléfonos, se perfilan como una herramienta prometedora para que la comunidad participe activamente en la detección temprana de contaminantes y promueva la calidad del agua.

QUÍMICA ANALÍTICA...O EL ARTE DE RECONOCER SUSTANCIAS

La Química Analítica es una rama de la Química que estudia la composición de la materia. La composición puede definirse en función de qué o cuánto está presente en una muestra de interés; cuando nos preguntamos ¿qué es lo que está presente? hablamos de análisis cualitativo, cuando la pregunta es ¿cuánto hay de ese componente? nos referimos al análisis cuantitativo. La búsqueda de instrumentos compactos y de bajo costo que permitan el análisis cualitativo y/o





cuantitativo continúa siendo un reto para la Química Analítica. Sin embargo, esta disciplina encontró en los teléfonos inteligentes una oportunidad para detectar y cuantificar diferentes compuestos en tiempo y espacio real, es decir, sin la necesidad de realizar un análisis en el laboratorio. Un ejemplo, es la detección de metales en agua. Dentro de los diferentes contaminantes de este recurso natural, la presencia de metales representa una problemática ambiental muy severa [8]. A pesar de que las leyes de protección del medio ambiente son cada vez más exigentes, hoy en día se encaran serios problemas de contaminación. Los metales ingresan al medio ambiente acuático principalmente por descargas directas de fuentes industriales, siendo la industria minera una de las más importantes [9]. Esto es debido principalmente a la liberación de aguas ácidas de minas activas y abandonadas con altos niveles de metales como cobre, hierro, manganeso y zinc. Después de que entran al medio ambiente, los metales son distribuidos en el agua, biota, suelos y sedimentos.

La importancia que tiene la detección de metales en aguas se debe a su elevada toxicidad, alta persistencia y rápida acumulación por los organismos vivos. Sus efectos tóxicos no se detectan fácilmente a corto plazo, pero la capacidad de acumularse poco a poco en los organismos afecta a mediano y largo plazo [10]. Los metales desempeñan un papel fundamental en nuestra vida y cumplen funciones esenciales en nuestro organismo. No obstante, la cantidad y la forma en que se administran pueden tener un impacto significativo en la mayoría de los órganos y sistemas de los seres vivos. A pesar de que metales como el zinc exhiben una toxicidad baja en mamíferos, es importante señalar que, para muchos organismos acuáticos, estos elementos pueden presentar una toxicidad considerable [11,12].



Los análisis de rutina para la detección de metales incluyen el uso de equipos costosos y personal altamente capacitado. Por supuesto, un teléfono inteligente no cuantificará la precisión y exactitud con la que lo hace, por ejemplo, un espectrofotómetro de absorción atómica (AAS) (un equipo muy costoso utilizado para la cuantificación de metales), pero es una alternativa accesible y al alcance de más usuarios. Sin embargo, no basta con tener un celular para detectar metales. Después de todo, sólo es una herramienta auxiliar pero no es el responsable del proceso de detección.

Aquí es cuando hace entrada la química y el desarrollo de moléculas sensoras o sensores moleculares (Ver **Figura 1**). Los sensores moleculares o quimiosensores, son moléculas capaces de unir selectiva y reversiblemente a un analito con un consecuente cambio en una o más de las propiedades del sistema, tal como el cambio de color (quimiosensores colorimétricos) o en la fluorescencia (quimiosensores fluorescentes) o cambios en el potencial redox (sensores electroquímicos), entre otros [13]. Existen dos procesos básicos que ocurren en la detección del analito: el reconocimiento molecular y la transducción de la señal. Para llevar a cabo de manera eficiente estos dos procesos, los quimiosensores normalmente están constituidos de tres componentes: un receptor (para enlazar a un analito específico), una unidad indicadora (encargada de dar la respuesta) y un espaciador (que cambia la geometría del sistema y modula la interacción electrónica entre las dos unidades) [14]. Además, los quimiosensores pueden ser clasificados en dos grandes grupos: los que discriminan entre analitos basados en sus propiedades físicas (como el peso molecular, presión de vapor, entre otros) y los que miden propiedades químicas (reactividad, potencial redox, interacciones ácido-base, entre otros).



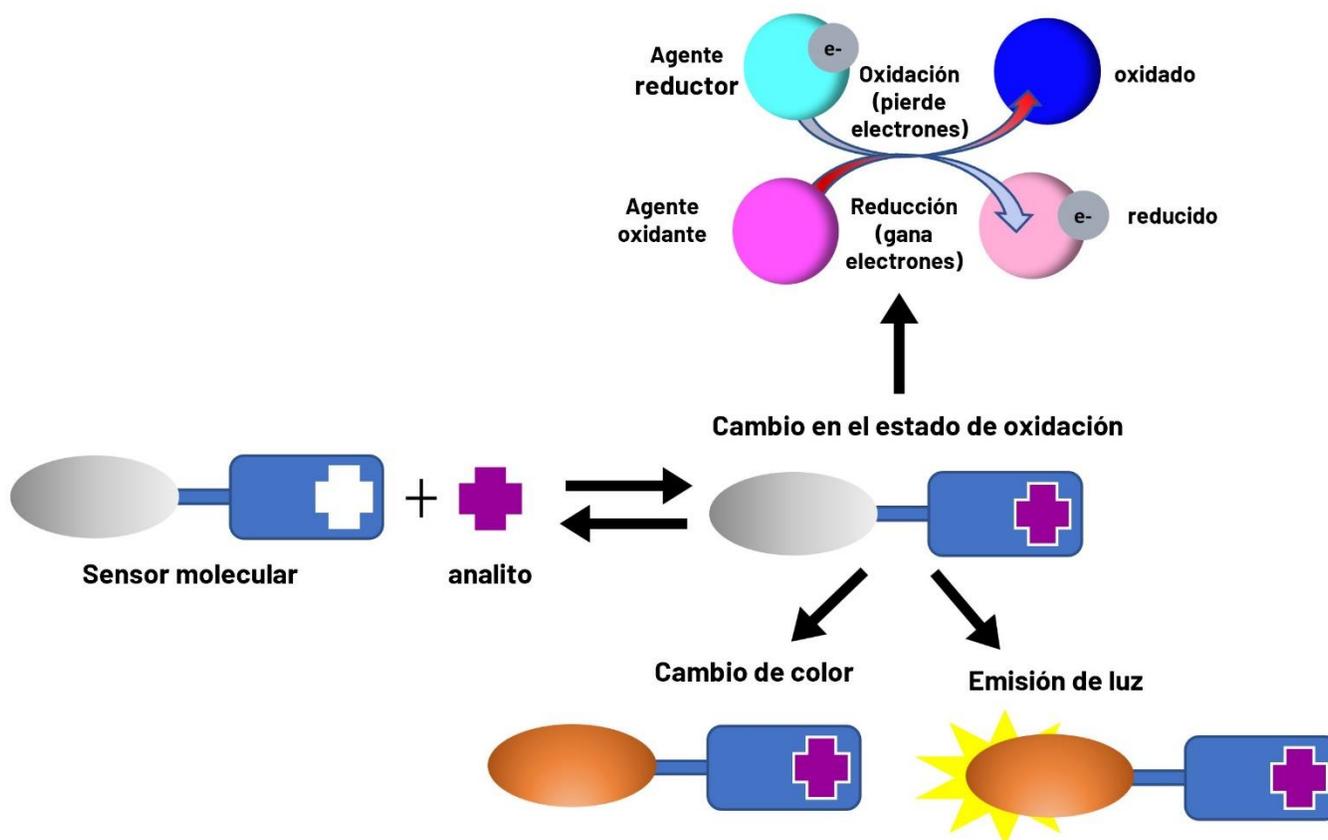


Figura 1. Tipos de respuestas que se pueden observar al interactuar un sensor molecular con un analito

Una de las maneras más eficientes para detectar analitos es mediante el uso de quimiosensores que presenten cambio de color a simple vista tras un evento de reconocimiento. Por ejemplo, estas moléculas permiten la conversión de la concentración de los metales en señales que pueden ser leídas en instrumentos accesibles o incluso a simple vista. Los sensores colorimétricos reciben especial interés debido a que permiten la detección cualitativa en espacio y tiempo real sin el uso de instrumentos analíticos costosos [15]. Los cambios de color siempre nos han fascinado, sobre

todo a los primeros (y actuales) químicos, después de todo, como Isaac Asimov (bioquímico y divulgador científico) manifestó: *Los orígenes de la Química como disciplina se encuentran estrechamente ligados a nuestra fascinación por los colores.* Pero además de gustarnos, los colores nos brindan información cualitativa de distintos procesos. En el supermercado solemos escoger nuestras frutas preferidas con base a su color, el cual relacionamos con la maduración de la fruta. Además, podemos notar los cambios de estación reflejados en el color de las hojas de los árboles. El color es un indicador universal y en química el estudio del color se denomina colorimetría.

COLORIMETRÍA

La cuantificación del color se realiza mediante la colorimetría, la cual estudia los procesos relacionados con el color a través de métodos que permiten la descomposición, análisis y descripción de la luz visible para cuantificar la información cromática. En este enfoque, se puede utilizar el ojo humano para determinar la concentración de una especie coloreada, al comparar los cambios de color con un grupo de soluciones estándar de concentración conocida. Aunque fue una de las primeras técnicas para evaluar la concentración de compuestos coloreados, nuevas metodologías más sofisticadas y sensibles han ido reemplazándola gradualmente. Sin embargo, el progreso en sensores de imagen y la posterior explosión en el desarrollo de dispositivos electrónicos a finales del siglo XX han generado nuevas oportunidades en este campo. Uno de los principales elementos estudiados por esta técnica son los metales, los cuales forman compuestos coloridos con otras moléculas, formando nuevos compuestos denominados complejos metálicos. Estos complejos pueden presentar características ópticas muy interesantes como el desarrollo de colores. Un ejemplo muy ilustrativo es la sangre, el color rojo característico



se debe a la hemoglobina, una proteína que en su interior contiene iones metálicos de hierro (Fe). Por otra parte, los pulpos tienen sangre azul debido a la presencia de cobre (Cu) en la hemocianina, proteína semejante a la hemoglobina, siendo la responsable del transporte de oxígeno en algunos crustáceos y moluscos.

El color también nos proporciona información cuantitativa como es el caso de los oxímetros, en estos aparatos al colocar tu dedo, pequeños rayos de luz atraviesan la sangre de tu dedo y por los cambios en la absorción de luz relaciona si la sangre se encuentra oxigenada o desoxigenada, indicando en la pantalla los niveles de saturación de oxígeno que presenta la sangre en ese momento. También es posible relacionar la concentración de metales en el agua con la intensidad de color (**Figura 2**), lo cual es útil para detectar la presencia de estos contaminantes en aguas naturales como ríos y acuíferos.

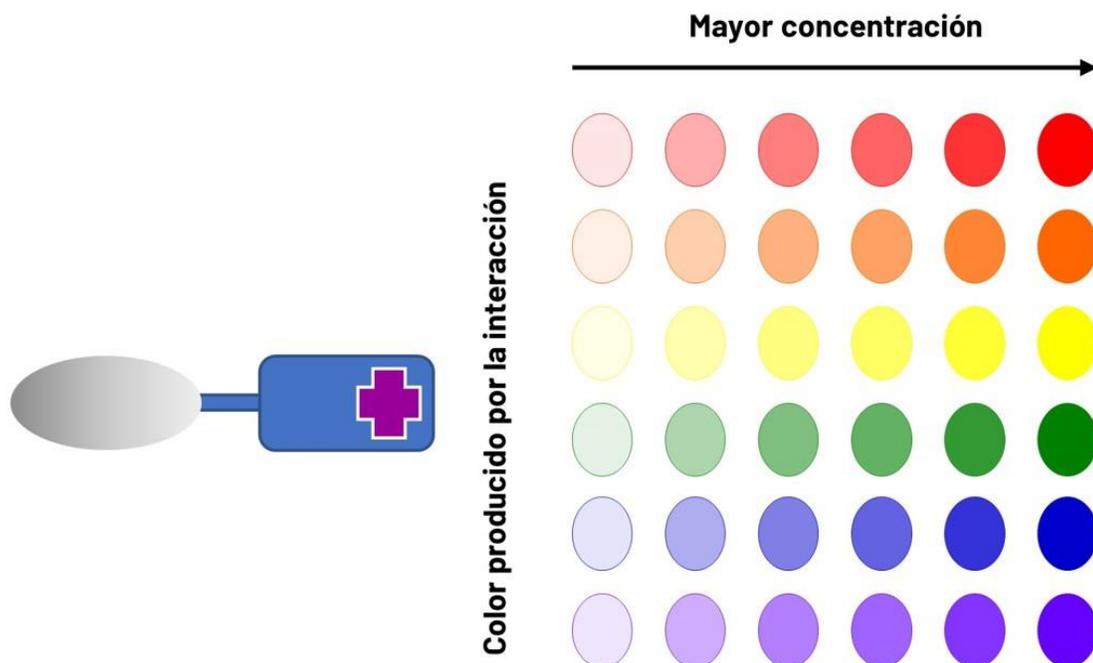


Figura 2. Sensor colorimétrico

IMPACTO DE LA MINERÍA EN LA CONTAMINACIÓN DE AGUA

Entre las actividades industriales que generan mayor contaminación por metales se encuentra la minería. La contaminación del agua es un reto importante en muchos países en desarrollo y, a menudo, las comunidades vulnerables cercanas a las explotaciones mineras son las más afectadas [16]. En México, la minería ha sido una actividad económica de gran importancia desde los tiempos de la colonia española. Los procesos de beneficio han generado, en estos más de 400 años de actividad, una gran cantidad de desechos, que han sido depositados en los alrededores de las minas y los ríos [17]. Además, es importante destacar que los metales no se limitan a ingresar solamente en las aguas superficiales, como los ríos. En situaciones en las que hay presencia de metales en la superficie, ya sea debido a la lluvia o el riego, el agua puede transportar estos metales, ya sea en forma disuelta o de partículas a través del suelo. Esta migración de los metales puede llevarlos a las capas más profundas del suelo y, con el tiempo, permitir su infiltración en los mantos acuíferos.

Es importante destacar que la industria minera en México, al igual que en muchas otras partes del mundo, ha sido objeto de preocupación debido a sus impactos ambientales, especialmente en lo que respecta al uso del cianuro [18,19]. Esta sustancia química tóxica se emplea en la extracción de oro y otros metales preciosos mediante el proceso de lixiviación. Aunque este proceso es efectivo para separar los minerales valiosos, también puede tener efectos negativos significativos en el medio ambiente y la salud humana si no se maneja adecuadamente.

En el estado de Sonora se han detectado problemas serios de contaminación debido a la actividad minera. Metales como el cobre, hierro, níquel, cadmio y arsénico se han encontrado en





concentraciones muy superiores a los criterios ecológicos de calidad de agua establecidos en México. El ejemplo más ilustrativo de esta problemática es el derrame ocurrido en el río Sonora en 2014, un evento que continúa resonando y ha dejado una cicatriz ambiental que, incluso nueve años después, persiste como un problema grave para el estado y sus habitantes.

Un indicio claro de la persistencia de este problema se refleja en las concentraciones de mercurio encontradas en el río Sonora, las cuales superan los 0.001 mg/L, que es el límite superior establecido por la normativa mexicana [20]. En cuanto al agua de pozos, el panorama tampoco resulta alentador, según el último muestreo realizado en 2023 para la Secretaría de Medio Ambiente, el 50% de los pozos monitoreados exhibieron parámetros fuera de las normas establecidas [20]. Entre estos parámetros, se destaca la presencia de arsénico, que supera el límite permisible de 0.02 mg/L al registrar hasta 0.03 mg/L. Asimismo, se encontraron concentraciones de manganeso que triplican el límite recomendado, alcanzando los 0.6 mg/L en lugar de 0.2 mg/L.

La persistencia de estos contaminantes en el agua del río y en los pozos señala una deficiencia notable en los esfuerzos de remediación. La historia del río Sonora sirve como recordatorio de la necesidad de proteger nuestros recursos naturales y abordar las consecuencias a largo plazo de los desastres ambientales.

En respuesta a los desafíos persistentes de la contaminación del agua por metales en el estado, investigadores de la Universidad de Sonora desarrollaron un material similar a un papel que cambia de color dependiendo del metal presente en el agua. Este material es un polímero de bajo costo económico, siendo una macromolécula (una molécula de alto peso) formada por la unión de moléculas más pequeñas que se repiten, conocidas como monómeros. En los últimos años,



los polímeros derivados de productos naturales han recibido especial interés en la detección y remoción de metales en aguas [21]. Un ejemplo es el uso del almidón, el cual es un biopolímero muy utilizado en la industria debido a su bajo costo y biodegradabilidad. Los investigadores diseñaron un material a base de almidón con la capacidad de detectar metales [22]. Para la obtención de este material se utilizó el método de "casting" o vaciado en placa. Inicialmente, se combinaron almidón de papa, glicerol, agua y un indicador colorimétrico llamado anaranjado de xilenol, que se agitó durante 30 minutos a una temperatura de 100°C. Una vez preparada la mezcla, se vertió en placas de acrílico de 10 cm de diámetro y se dejó enfriar durante 20 minutos. Luego, las placas se colocaron en una estufa a 50°C durante 5 horas. El resultado final fue un material sólido (similar a un papel plastificado) de color anaranjado. La preparación de este material es fácil, ya que no requiere el uso de equipo sofisticado. Además, su costo es reducido, especialmente considerando que el componente principal es el almidón de papa. Este material fue diseñado para detectar cobre, zinc y níquel, metales que a menudo se encuentran en altas concentraciones en aguas cercanas a minas [22].

El cobre (Cu) es un elemento esencial para la vida humana, pero cuando se presenta en concentraciones superiores a los 2 mg/L puede generar riesgos a la salud como náusea, vómitos, calambres estomacales o diarrea [23]. Al igual que otros metales pesados, el cobre tiende a bioacumularse, lo cual provoca una serie de complicaciones a largo plazo. Ejemplos de padecimientos debido a la acumulación de cobre en el organismo son la hepatitis activa crónica y el hiperparatiroidismo, entre otros [24]. Por otra parte, el zinc (Zn) es de los menos tóxicos de todos los oligoelementos, que son elementos presentes en pequeñas cantidades en los seres vivos y tanto su ausencia como su exceso puede ser perjudicial para el organismo. Sin embargo,





se ha evidenciado el desarrollo de alteraciones como consecuencia de la ingestión de dosis moderadamente elevadas durante períodos de tiempo largos. Una suplementación con zinc, especialmente en altas dosis, también puede producir otros efectos adversos como interferir y disminuir el estatus corporal de cobre [25]. Finalmente el níquel (Ni) induce el estrés oxidativo mediante la producción y acumulación de especies de oxígeno y de nitrógeno reactivas (ROS y RNS, respectivamente), induciendo un desequilibrio celular [26].

El material desarrollado por los investigadores cambió de color de acuerdo con el metal: de naranja a morado con la presencia de Cu, a rosa con el Zn y a azul con el Ni. Estos cambios de color permitieron relacionar la concentración del metal con el color por los parámetros RGB (Red, Green, Blue, por sus siglas en inglés). Los parámetros RGB hacen alusión al rojo, verde y azul, los cuales son los tres componentes de color usados para definir completamente un color [27]. Es el sistema de color más común en cámaras digitales debido a que el sistema de visión humana trabaja de manera similar y por esta razón la mayoría de los detectores de color presentes en los teléfonos inteligentes son diseñados para proveer información en coordenadas RGB [28]. Este sistema ha sido ampliamente utilizado en la cuantificación de sustancias en solución e inmovilizadas usando procesamiento de imágenes digitales y software específico que hace posible la extracción de información colorimétrica al seleccionar las áreas de interés en la imagen [29]. Por ejemplo, se han utilizado polímeros sensores para la detección colorimétrica de mercurio en carne de pescado fresco, donde el cambio de color en el polímero al estar en contacto con el metal permitió la cuantificación por RGB [30]. Este espacio de color también ha sido aplicado en lenguas y narices electrónicas para identificar la presencia de hasta 100 compuestos orgánicos volátiles (VOCs) usando huellas digitales RGB [31].



Aprovechando que las cámaras de los smartphones cuentan con detectores electrónicos que reconocen el sistema de color RGB, los investigadores de la Universidad de Sonora realizaron experimentos utilizando un celular como instrumento analítico. El experimento consistió en añadir 5 microlitros (¡menos de una gota!) de una solución que contenía cobre, níquel y zinc al material desarrollado, variando las concentraciones de estos metales en un rango de 0.2 a 5 mg/L. Una vez añadido el volumen de la solución metálica observaron que el material cambió de color de anaranjado a morado con la solución de cobre, azul con el níquel, y rosa con el zinc. Estos cambios de colores eran proporcionales a la concentración del metal. Es decir, la intensidad del color era más fuerte conforme aumentaba la concentración del metal.

Gracias a estos cambios de color fue posible extraer las coordenadas RGB a partir de fotografías tomadas con un celular y relacionarlas con la concentración del metal (**Figura 3**). Además, las concentraciones de los tres metales pudieron ser detectadas en niveles tan bajos como los valores de calidad de agua permitidos por la normatividad mexicana.

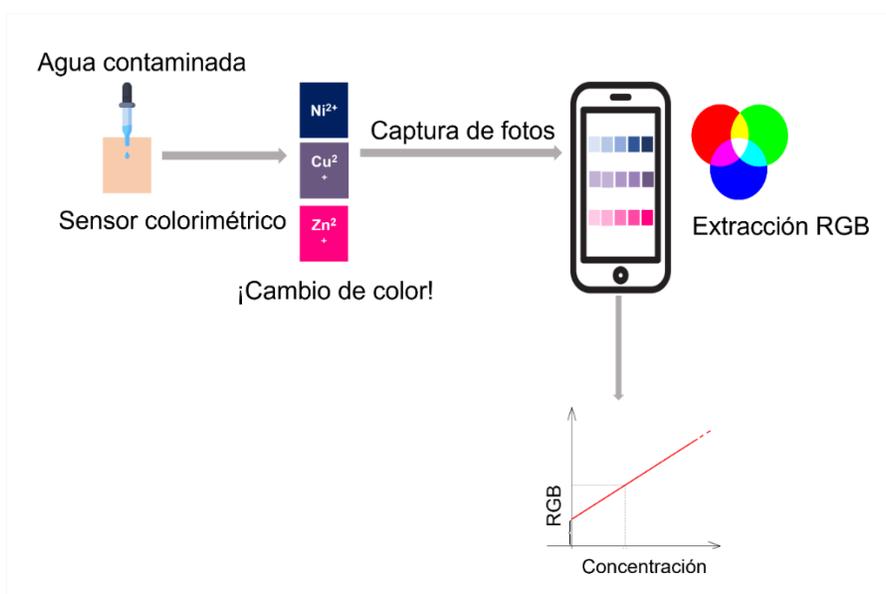


Figura 3. Representación del proceso de detección colorimétrica





Usualmente, la detección y cuantificación de metales incluyen técnicas muy costosas que requieren personal altamente capacitado. Es por eso por lo que los investigadores de Sonora decidieron aprovechar el uso de smartphones como laboratorios portátiles. Basta contar con un teléfono, un material biodegradable fácilmente manipulable, y una gota de agua para poder determinar si un cuerpo de agua está contaminado con níquel, cobre o zinc, metales que se encuentran en concentraciones muy por encima de la normatividad mexicana.

¡Pero alto ahí! Al igual que la mayoría de las técnicas analíticas, el método colorimétrico asistido por smartphone tiene sus limitaciones. Las principales incertidumbres están relacionadas con la captura de imágenes. Para obtener resultados confiables, es necesario tener un control estricto de las condiciones de iluminación. Cuando se trata de percibir los colores, hay tres factores clave: la fuente de luz (por ejemplo, una lámpara LED), la forma en que la radiación incide en la película colorimétrica y el dispositivo que usamos para leer los colores (el smartphone). En las cámaras de los teléfonos celulares, el sensor más común para detectar la luz es el semiconductor de óxido metálico complementario (CMOS, por sus siglas en inglés). Sin embargo, estos chips pueden variar de un fabricante y modelo a otro, lo que significa que necesitas usar el mismo smartphone para el análisis o crear curvas de calibración específicas para diferentes smartphones.

Además, es necesario investigar si el material desarrollado mantiene sus propiedades sensoriales a lo largo del tiempo.



¿FUTUROS PASOS?

Antes de poder aplicar este tipo de materiales en la vida real es esencial realizar estudios adicionales. En primer lugar, se deben llevar a cabo estudios ambientales específicos para evaluar cómo el polímero sensor funcionaría en las condiciones particulares de una zona afectada. Esto incluiría factores como la presencia de otros contaminantes, variaciones estacionales y la respuesta sensora a diferentes entornos acuáticos.

Y claro, no hay que olvidar el bolsillo. Es necesario medir si esto es viable económicamente, no solo cuánto cuesta desarrollar el material, sino también los gastos asociados con el mantenimiento y la calibración.

Finalmente, hay que adaptar la solución a las personas que realmente lo necesitan. Los beneficiarios finales de la película colorimétrica deberían ser los usuarios de agua, es decir, los ciudadanos. El monitoreo participativo de contaminantes se ha revelado como un medio eficaz para prevenir la contaminación del agua [32,33]. El uso de sensores de bajo costo puede potenciar el monitoreo, manteniendo a la comunidad involucrada en cada etapa y comprendiendo las limitaciones y beneficios del método analítico [34]. Hasenfrazt y colaboradores [35] llevaron a cabo un monitoreo participativo de la contaminación del aire mediante el uso de teléfonos inteligentes en Suiza. Y en nuestro país, Burgos y colaboradores [36] informaron sobre un caso de monitoreo participativo de la calidad del agua en áreas rurales de México, donde se evaluaron parámetros básicos como pH, dureza, alcalinidad, turbidez y pruebas bacteriológicas.





Tomando en cuenta que Sonora es un estado minero por excelencia, la aplicación de materiales sensores, acompañado de la capacitación de los habitantes de las localidades vulnerables cercanas a los sitios mineros, podría acercarnos al monitoreo constante de metales pesados.

Aunque aún es necesaria más investigación, podemos ir pensando en opciones para que los ciudadanos puedan monitorear el estado de sus aguas. ¿Y por qué no? Trabajar sobre la propuesta de un kit de detección rápida de metales, el cual incluya un material (parecido a un papel, pero impermeable al agua) fácilmente manipulable, que permita relacionar la intensidad de color con la concentración del metal. La detección podría ser cualitativa con base a una escala colorimétrica, o cuantitativa al tomar una fotografía del material y relacionar los parámetros RGB de la fotografía con la concentración del metal. Las localidades podrían monitorear constantemente la condición de sus aguas, que son vulnerables a la contaminación de metales debido a la cercanía de la mina y evaluar si sobrepasa o no los límites máximos permitidos. Es posible que en un futuro próximo la aplicación de estos sensores colorimétricos esté al alcance de todos y sea posible que, mediante una aplicación (App), esté conectado a dependencias gubernamentales que llevan el control de la calidad de las aguas.

Referencias

- [1] INEGI, “Encuesta Nacional sobre Disponibilidad y Uso de Tecnologías de la Información en los Hogares”, 2020. Recuperado de:
https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2021/OtrTemEcon/ENDUTIH_2020.pdf



- [2] Sivakumar, Rajamanickam, and Nae Yoon Lee. “Recent Progress in Smartphone-Based Techniques for Food Safety and the Detection of Heavy Metal Ions in Environmental Water” in *Chemosphere*, 2021, 275 (July): 130096.
<https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.130096>.
- [3] Y. Zhang, T. Xue, L. Cheng, J. Wang, R. Shen, J. Zhang, Smartphone-assisted colorimetric biosensor for on-site detection of Cr³⁺ ion analysis, *Anal. Chim. Acta.* 1199 (2022) 339603.
<https://doi.org/10.1016/J.ACA.2022.339603>.
- [4] M.L. Firdaus, A. Aprian, N. Meileza, M. Hitsmi, R. Elvia, L. Rahmidar, R. Khaydarov, Smartphone Coupled with a Paper-Based Colorimetric Device for Sensitive and Portable Mercury Ion Sensing, (2019). <https://doi.org/10.3390/chemosensors7020025>.
- [5] N. Emmanuel, R. Haridas, S. Chelakkara, R.B. Nair, A. Gopi, M. Sajitha, K. Yoosaf, Smartphone Assisted Colourimetric Detection and Quantification of Pb²⁺ and Hg²⁺ Ions Using Ag Nanoparticles from Aqueous Medium, *IEEE Sens. J.* 20 (2020) 8512–8519.
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2984580>.
- [6] An-Liang Zhang (2021) Smartphone-Based Colorimetric Detection of Heavy Metal Copper (II) Ion by Help of Surface Acoustic Wave, *Ferroelectrics*, 583:1, 41-50,
<https://doi.org/10.1080/00150193.2021.1980326>
- [7] Njue, N., Stenfert Kroese, J., Gräf, J., Jacobs, S. R., Weeser, B., Breuer, L., & Rufino, M. C. (2019). Citizen science in hydrological monitoring and ecosystem services management: State of the art and future prospects. *Science of the Total Environment*, 693, 133531.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.337>
- [8] Priyadarshane, Monika, and Surajit Das. “Journal of Environmental Chemical Engineering Biosorption and Removal of Toxic Heavy Metals by Metal Tolerating Bacteria for Bioremediation of Metal Contamination: A Comprehensive Review” in *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104686>.
- [9] Alloway, B. J.; Ayres, D. C., Chemical principles of environmental pollution. Blackie Academic and Professional. An imprint of Chapman and Hall. Oxford, UK: 1993.



- [10] Ayangbenro, Ayansina Segun, and Olubukola Oluranti Babalola. "A New Strategy for Heavy Metal Polluted Environments: A Review of Microbial Biosorbents" in *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14 (1): 94. <https://doi.org/10.3390/ijerph14010094>.
- [11] Hong, Y. J., Liao, W., Yan, Z. F., Bai, Y. C., Feng, C. L., Xu, Z. X., & Xu, D. Y. (2020). Progress in the research of the toxicity effect mechanisms of heavy metals on freshwater organisms and their water quality criteria in China. *Journal of Chemistry*, 2020, 1-12.
- [12] Brinkman, S.F., Johnston, W.D. Acute Toxicity of Zinc to Several Aquatic Species Native to the Rocky Mountains. *Arch Environ Contam Toxicol* 62, 272–281 (2012). <https://doi.org/10.1007/s00244-011-9698-3>
- [13] Kaur, B., Kaur, N., & Kumar, S. (2018). Colorimetric metal ion sensors—a comprehensive review of the years 2011–2016. *Coordination chemistry reviews*, 358, 13-69. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2017.12.002>.
- [14] Prodi, L.; Bolletta, F.; Montalti, M.; Zaccheroni, N., Luminescent chemosensors for transition metal ions. *Coordination Chemistry Reviews* 2000, 205 (1), 59-83. [https://doi.org/10.1016/S0010-8545\(00\)00242-37](https://doi.org/10.1016/S0010-8545(00)00242-37)
- [15] Trigo-López, M.; Muñoz, A.; Ibeas, S.; Serna, F.; García, F. C.; García, J. M., Colorimetric detection and determination of Fe (III), Co (II), Cu (II) and Sn (II) in aqueous media by acrylic polymers with pendant terpyridine motifs. *Sensors and Actuators B: Chemical* 2016, 226, 118-126. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.11.116>
- [16] Obasi, Philip Njoku, and Bennard Benedict Akudinobi. "Potential Health Risk and Levels of Heavy Metals in Water Resources of Lead–Zinc Mining Communities of Abakaliki, Southeast Nigeria" in *Applied Water Science*, 2020, 10 (7): 1–23. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01233-z>.
- [17] Sommer, I., Fernández, P., Rivas, H., & Gutiérrez, M. E. (2000). La geoestadística como herramienta en estudios de contaminación de suelos. Análisis de caso: afectación de suelo por arsénico, plomo y cadmio contenidos en jales mineros. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 16(4), 205-214.



- [18] Hernandez, J., Patino, F., Rivera, I., Reyes, I. A., Flores, M. U., Juarez, J. C., & Reyes, M. (2014). Leaching kinetics in cyanide media of Ag contained in the industrial mining-metallurgical wastes in the state of Hidalgo, Mexico. *International Journal of Mining Science and Technology*, 24(5), 689-694.
- [19] Alvillo-Rivera, A., Garrido-Hoyos, S., Buitron, G., Thangarasu-Sarasvathi, P., & Rosano-Ortega, G. (2021). Biological treatment for the degradation of cyanide: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 1418-1433.
- [20] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Dictamen Diagnóstico Ambiental Río Sonora. 28 de septiembre de 2023. Recuperado el 15 de noviembre de 2023 de: <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/dictamen-diagnostico-ambiental-rio-sonora?state=publishe>
- [21] Zhang, Meng, Lina Zhang, Huafeng Tian, and Ang Lu. "Universal Preparation of Cellulose-Based Colorimetric Sensor for Heavy Metal Ion Detection" in *Carbohydrate Polymers*, 2020, vol. 236: 116037. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116037>.
- [22] Hernández Cruz, A. "Detección Colorimétrica de Metales Potencialmente Tóxicos en Agua por Películas Sensoras (Maestría)", 2018. Universidad de Sonora.
- [23] WHO, Guidelines for drinking-water quality, World Health Organization, 2004. Recuperado el 11 de noviembre de 2023 de: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>.
- [24] Dorsey, A., & Ingerman, L. (2004). Toxicological profile for copper.
- [25] Rubio, C.; González Weller, D.; Martín-Izquierdo, R. E.; Revert, C.; Rodríguez, I.; Hardisson, A., El zinc: oligoelemento esencial. *Nutrición Hospitalaria* 2007, 22 (1), 101-107.
- [26] Olivares Arias, V.; Valverde Som, L.; Quiros Rodríguez, V.; García Romero, R.; Muñoz, N.; Navarro Alarcón, M.; Cabrera Vique, C., Níquel en alimentos y factores influyentes en sus niveles, ingesta, biodisponibilidad y toxicidad: una revisión. *CyTA-Journal of Food* 2015, 13 (1), 87-101. <https://doi.org/10.1080/19476337.2014.917383>
- [27] Ye, Shuang, Lanlan Li, Yue Ou, Weijia Li, Shu Zhang, Ke Huang, Hong Luo, Zhirong Zou, and Xiaoli Xiong. "In Situ Formation of Silver Nanoparticles via Hydride Generation: A Miniaturized/Portable Visual Colorimetric System for Arsenic Detection in Environmental Water





- Samples” in *Analytica Chimica*, 2022, Acta 1192: 339366. <https://doi.org/10.1016/J.ACA.2021.339366>.
- [28] Fernandes, Gabriel Martins, Weida R. Silva, Diandra Nunes Barreto, Rafaela S. Lamarca, Paulo Clairmont F. Lima Gomes, João Flávio da S Petrucci, and Alex D. Batista. “Novel Approaches for Colorimetric Measurements in Analytical Chemistry – A Review” in *Analytica Chimica* 2020, Acta 1135 (October): 187–203. <https://doi.org/10.1016/J.ACA.2020.07.030>
- [29] Shishkin, Y. L.; Dmitrienko, S. G.; Medvedeva, O. M.; Badakova, S. A.; Pyatkova, L. N., Use of a scanner and digital image-processing software for the quantification of adsorbed substances. *Journal of Analytical Chemistry* 2004, 59 (2), 102-106. <https://doi.org/10.1023/B:JANC.0000014733.32082.4b>
- [30] Capitán-Vallvey, L. F.; Lopez-Ruiz, N.; Martinez-Olmos, A.; Erenas, M. M.; Palma, A. J., Recent developments in computer vision-based analytical chemistry: A tutorial review. *Analytica chimica acta* 2015, 899, 23-56.
- [31] Askim, J. R.; Mahmoudi, M.; Suslick, K. S. “Optical sensor arrays for chemical sensing: the optoelectronic nose” in *Chemical Society Reviews* 2013, 42 (22), 8649-8682.
- [32] O. Laatikainen, T. Samarina, P. Haapea, A. Belenikhina, Participatory Monitoring as A Supportive Tool for Better Situational Awareness in Contaminants’ Leakage and Prevention of Environmental Pollution, *Procedia Environ. Sci. Eng. Manag.* 7 (2020) 131–136.
- [33] À. Boso, B. Álvarez, C. Oltra, J. Garrido, C. Muñoz, Á. Hofflinger, Out of sight, out of mind: participatory sensing for monitoring indoor air quality, *Environ. Monit. Assess.* 192 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-8058-z>.
- [34] A. Commodore, S. Wilson, O. Muhammad, E. Svendsen, J. Pearce, Community-based participatory research for the study of air pollution: a review of motivations, approaches, and outcomes, *Environ. Monit. Assess.* 189 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6063-7>.
- [35] D. Hasenfratz, O. Saukh, S. Sturzenegger, and L. Thiele, “IPSN’12 - Proceedings of the 11th International Conference on Information Processing in Sensor Networks,” IPSN’12 - Proc. 11th Int. Conf. Inf. Process. Sens. Networks, pp. 1–5, 2012.



- [36] A. Burgos, R. Páez, E. Carmona, H. Rivas, A systems approach to modeling Community-Based Environmental Monitoring: a case of participatory water quality monitoring in rural Mexico, *Environ. Monit. Assess.* 185 (2013) 10297–10316.

Cómo citar este artículo:

Hernández Cruz, A., & Santacruz Ortega, H. (2023). Detección de metales en agua a través de teléfonos inteligentes. *EPISTEMUS*, 17(35). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i35.299>

