

Integración de estrategias sostenibles basadas en dispositivos miniaturizados en papel en la enseñanza de Química Analítica

Villarino, N.; Abalde-Pujales, A.; Collazo-Abalo, A.; Treviño, E.; Romero, V.; Pena-Pereira, F.

^a Centro de Investigación Mariña, Departamento de Química Analítica y Alimentaria, Grupo QA2, Edificio CC Experimentais, Universidade de Vigo, Campus de Vigo, As Lagoas Marcosende, 36310 Vigo, Spain. (nerea.villarino@uvigo.gal)

Palabras clave: aguas; ciencia ciudadana; PADs; práctica de laboratorio; smartphone; sostenibilidad; vanadio

La sostenibilidad ambiental presenta actualmente un significativo impacto en la ciudadanía, lo que hace cada vez más necesaria la adaptación de las metodologías empleadas en las prácticas docentes a alternativas que se ajusten a los principios de la Química Verde. En este sentido, en los últimos años se han desarrollado métodos analíticos miniaturizados que requieren un consumo mínimo de reactivos peligrosos, y conllevan una generación de residuos muy reducida. Además, el creciente empleo de sistemas de telefonía móvil para la digitalización y procesado de imagen puede contribuir a la democratización del análisis químico. En línea con estas tendencias emergentes, en este trabajo se plantea el uso de un dispositivo analítico en papel (*paper-based analytical device*, PAD) de bajo coste para la determinación de vanadio presente en muestras acuosas ambientales mediante detección colorimétrica asistida por un teléfono móvil. Esta metodología se propone como complemento didáctico a otros métodos instrumentales aplicados en laboratorios docentes de Grado de Química, resultando además extrapolable a iniciativas de ciencia ciudadana en las cuales los análisis de campo son realizados directamente por voluntarios, quienes pueden contribuir a la recopilación de resultados de interés ambiental.

1. Simplificación del método y reducción de residuos y reactivos peligrosos

La determinación de vanadio en aguas requiere habitualmente el empleo de técnicas instrumentales ópticas, destacando los métodos espectrofotométricos cinético-catalíticos. El análisis mediante este tipo de métodos requiere un consumo relativamente elevado de reactivos y de muestra, con la consiguiente considerable generación de residuos. Estos métodos requieren un sistema instrumental de difícil portabilidad, coste relativamente elevado y personal con formación específica en técnicas instrumentales. Teniendo en cuenta estos factores, se puede considerar que estos métodos presentan escasa adecuación a los principios de la Química Verde.

Por ello, se plantea una alternativa miniaturizada al método espectrofotométrico cinético-catalítico en dispositivos basados en papel (PADs) para la determinación de vanadio mediante adición directa de un pequeño volumen de muestra (17 μL) sobre el PAD [1]. Además de la reducción de los volúmenes de muestra necesarios para el análisis, esta alternativa supone una significativa reducción del consumo de reactivos (35 μL por muestra), lo cual implica una mínima generación de residuos. Cabe destacar que el coste del método se ve significativamente reducido, ya que requiere una cantidad muy reducida de reactivos y la reacción colorimétrica se produce sobre un soporte de celulosa. Para la detección colorimétrica se recurre al uso de la cámara de un teléfono móvil, de manera que la digitalización de la zona de reacción del PAD permite obtener la respuesta analítica correspondiente. Así, el uso combinado de los PADs con la cámara de un teléfono móvil permite el análisis de campo, facilitando su aplicación en el punto de necesidad sin tener que recurrir al transporte de muestra a un laboratorio centralizado para su posterior análisis.

2. Miniaturización del método y ampliación de habilidades digitales

La aplicación del método miniaturizado en paralelo con el método convencional permite que el alumnado identifique y valore las ventajas de la miniaturización en el proceso de medida química, tales como la menor generación de residuos o el consumo responsable de recursos. A su vez, el uso del teléfono móvil para la digitalización y procesamiento de datos les proporciona un nuevo enfoque sobre su uso como herramienta analítica, ampliando así sus conocimientos de tratamiento de imagen y habilidades digitales.

3. Comparación del método propuesto con un método instrumental convencional

Para el desarrollo de la práctica, se plantea la aplicación del método cinético-catalítico convencional y de su alternativa miniaturizada con PADs al análisis de muestras acuosas en paralelo, de manera que se puedan comparar los resultados obtenidos mediante ambos métodos. De este modo, se puede apreciar nítidamente la diferencia en el consumo de reactivos y generación de residuos de ambos métodos, además de verificar que los resultados obtenidos con el método miniaturizado no presentan diferencias significativas con respecto a los obtenidos con el método convencional, comprobando así la validez del método propuesto y su aplicabilidad a muestras acuosas ambientales. Además, con el objetivo de evaluar de manera cuantitativa la sostenibilidad ambiental del método propuesto, el alumnado utiliza la herramienta AGREE [2], que permite valorar el grado de cumplimiento de ambos métodos con los principios de la Química Analítica Verde. Los resultados obtenidos muestran diferencias significativas entre los dos enfoques evaluados (Figura 1), destacando el sistema miniaturizado por un mejor comportamiento respecto a su sostenibilidad.

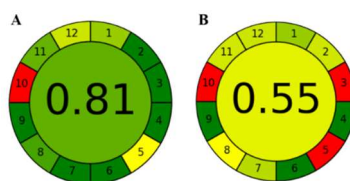


Figura 1. Pictogramas AGREE derivados de la evaluación del método propuesto (A) y el método espectrofotométrico cinético-catalítico para la determinación de vanadio (B).

4. Resultados, ciencia ciudadana y transferencia de conocimiento

El método miniaturizado se caracteriza por su rapidez, bajo coste, simplicidad y portabilidad. Estos aspectos hacen especialmente interesante su adaptación al ámbito académico y a proyectos de ciencia ciudadana. El método favorece la participación activa de la ciudadanía en análisis medioambiental mediante el empleo de sus propios teléfonos móviles para realizar los análisis. De manera que la participación activa de los voluntarios permite determinar la concentración de vanadio en muestras acuosas ambientales de cualquier procedencia. Este enfoque permite implementar el método en el contexto de ciencia ciudadana por su fácil aplicabilidad en entornos externos.

5. Conclusiones

La implementación de metodologías analíticas sostenibles en el laboratorio docente favorece la integración de los principios de la Química Verde en la formación del alumnado de Química. En este contexto, los PADs combinados con teléfonos móviles constituyen una alternativa innovadora para la determinación cuantitativa de analitos mediante procedimientos sencillos, rápidos y de bajo impacto ambiental. La reducción del consumo de reactivos, la mínima generación de residuos y la escasa necesidad de equipamiento especializado facilitan su incorporación en materias de Química Analítica como complemento o sustitución de prácticas convencionales. Asimismo, el uso de AGREE permite evaluar y comparar metodologías desde la perspectiva de la Química Verde, promoviendo la adquisición de competencias experimentales y la valoración crítica de su impacto ambiental.

Bibliografía

[1] Treviño, E.; Villarino, N.; Lavilla, I.; Bendicho, C.; Pena-Pereira, F. (2026), A 3D-Microfluidic Paper-Based Analytical Device for the Kinetic-Catalytic Colorimetric Determination of Vanadium with Smartphone-Based Readout, *Talanta*, (305): 129634.

[2] Pena-Pereira, F.; Wojnowski, W.; Tobiszewski, M. (2020), AGREE-Analytical GREENness Metric Approach and Software, *Anal. Chem.* (92): 10076-10082.

Agradecimientos

Los autores agradecen al MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE (Project PID2022-136337OB-I00).