

Dispositivos analíticos en papel y ciencia ciudadana: una propuesta sostenible para la docencia en Química Analítica

Abalde-Pujales, A.; Villarino, N.; Collazo, A.; Carro, A.; Romero, V.; Pena-Pereira, F.

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.
(alberto.abalde.pujales@uvigo.gal)

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

La formación de químicos conscientes del impacto ambiental exige rediseñar las prácticas docentes bajo los principios de la Química Verde. En este contexto, la incorporación de metodologías analíticas de bajo coste, mínima generación de residuos y uso de equipamiento accesible constituye una oportunidad para renovar el enfoque de la enseñanza de la Química Analítica. El presente trabajo propone una práctica de laboratorio orientada a estudiantes de Grado de Química, especialmente adecuada para materias de segundo curso durante el cual se introducen los fundamentos y principios básicos de la Química Analítica. La práctica propuesta adapta un estudio reciente basado en un dispositivo analítico en papel (paper-based analytical device, PAD) y detección colorimétrica asistida por smartphone para la cuantificación de azúcares reductores en miel, planteándose como alternativa más sostenible al método oficial AOAC 920.183 Lane Eynon.

1. Introducción

El método oficial AOAC 920.183 Lane Eynon, basado en la valoración de Fehling, es un procedimiento laborioso que requiere la preparación de grandes volúmenes de reactivos, incluyendo disoluciones concentradas de sulfato de cobre, tartrato de sodio y medio fuertemente alcalino, lo que implica un elevado consumo de reactivos y generación de residuos con contenido metálico. Además, el procedimiento convencional implica una etapa de estandarización y dilución, con un consumo significativo de agua. La determinación experimental requiere calentamiento hasta ebullición y mantenimiento de la mezcla caliente durante varios minutos, incrementando el consumo energético. Estos aspectos limitan su alineación con los principios de la Química Verde.

En contraste, el PAD propuesto miniaturiza significativamente el procedimiento analítico, utilizando únicamente 6 μL de reactivo de Benedict y 8 μL de muestra de miel diluida, lo que reduce drásticamente el consumo de reactivos y muestra. Frente a los elevados volúmenes de disoluciones de cobre y medio alcalino requeridos en el método oficial, esta metodología minimiza tanto la generación de residuos químicos como el empleo de sustancias potencialmente contaminantes. Además, los PADs se fabrican con materiales biodegradables, alineándose con los principios 1, 3 y 5 de la Química Verde. Desde el punto de vista logístico, el método propuesto requiere únicamente una placa calefactora y un smartphone para la detección colorimétrica, evitando el uso extensivo de material volumétrico y de vidrio convencional. Asimismo, la reacción colorimétrica con el PAD se completa en solo 90 s a 110 $^{\circ}\text{C}$, reduciendo considerablemente el tiempo experimental y el consumo energético asociado, contribuyendo desarrollo de prácticas docentes más sostenibles y accesibles.

2. Integración de la economía circular y competencias digitales

El uso de papel como soporte analítico permite discutir en el aula la reutilización de materiales celulósicos, su reciclabilidad y el impacto de los consumibles en el laboratorio. Además, el diseño digital de los patrones hidrofóbicos introduce al estudiantado en conceptos de fabricación sostenible y microfluídica accesible. El empleo del smartphone como sistema de adquisición de datos permite trabajar competencias digitales y de tratamiento de imagen, esenciales en la Química Analítica moderna. El trabajo de referencia demostró la robustez del sistema frente a diferentes modelos de smartphone, facilitando su aplicación en grupos numerosos y entornos con recursos limitados.

3. Comparación docente con el método oficial Lane Eynon

La práctica puede estructurarse como una actividad de evaluación comparativa: el estudiantado realiza los distintos métodos, el método oficial AOAC 920.183 Lane-Eynon, y el sistema miniaturizado con

PADs basado en la reacción de Benedict y analiza diferencias en precisión, residuos generados, peligrosidad y coste. El trabajo demuestra que los resultados del PAD no presentan diferencias significativas respecto al método oficial AOAC 920.183 Lane-Eynon, lo que permite discutir la validez de métodos alternativos y su potencial en control de calidad alimentaria.

4. Resultados, ciencia ciudadana y transferencia de conocimiento

La simplificación instrumental del método propuesto, junto con su bajo coste y rapidez, permite extender su aplicación fuera del entorno estrictamente académico. Esto abre la posibilidad de incorporar enfoques de ciencia ciudadana, donde el estudiantado puede participar en la generación de datos analíticos en contextos reales, como el análisis de miel comercial. Este enfoque permite generar conjuntos de datos más amplio mediante la participación de múltiples usuarios. Reforzando la conexión entre ciencia y sociedad, mostrando la relevancia de la Química Analítica en la seguridad alimentaria y promoviendo una comprensión más accesible y distribuida del método científico. Para cuantificar de forma objetiva el impacto ambiental de cada metodología, el estudiantado emplea el software AGREE, el cual permite evaluar el grado de cumplimiento de los principios de la Química Verde mediante una puntuación global y una representación visual desglosada por diferentes criterios. Esta herramienta evidencia diferencias claras entre los tres métodos (Fig. 1), situando el sistema PAD como la opción más alineada con los principios de sostenibilidad.

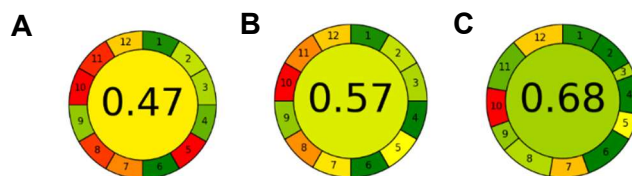


Figura 1. Pictogramas AGREE derivados de la evaluación GAC del método estándar para el método de Lane-Eynon (A) del método Benedict (B) y del método propuesto (C).

4. Conclusiones

La adaptación del PAD asistido por smartphone como práctica docente constituye una herramienta eficaz para integrar la sostenibilidad y la Química Verde en el currículo de Química Analítica. Su bajo coste, rapidez, mínima generación de residuos y ausencia de instrumental complejo lo convierten en una alternativa idónea para sustituir o complementar prácticas tradicionales como el método Lane Eynon. Esta propuesta promueve una formación más responsable, alineada con los retos actuales de sostenibilidad y con la necesidad de capacitar a futuros químicos en metodologías accesibles, digitales y ambientalmente respetuosas. El uso de AGREE en el aula permite integrar la evaluación ambiental, proporcionando al estudiantado un marco cuantitativo para la comparación de metodologías desde el aspecto de la Química Verde.

Bibliografía

- [1] Carro, A.; Lavilla, I.; Bendicho, C.; Romero, V. (2026), Smartphone-Assisted Paper-Based Analytical Device for Rapid Colorimetric Detection of Total Reducing Sugars in Honey, *Sensors*, (26): 3031.
- [2] Pena-Pereira, F.; Wojnowski, W.; Tobiszewski, M. (2020), AGREE—Analytical GREENness Metric Approach and Software, *Anal. Chem.* (92): 100076-10082.

Agradecimientos

Los autores agradecen al MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE (Project PID2022-136337OB-I00) y a la Universidade de Vigo por la beca postdoctoral en el marco del programa “Retención de Talento Investigador en la Universidad de Vigo 2023”.