

## GUÍA BÁSICA DE CÓMO FABRICAR DISPOSITIVOS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D EN QUÍMICA ANALÍTICA

Enrique Javier Carrasco Correa<sup>1</sup>, Alejandro Gil Aparicio<sup>1</sup>, Miguel Ángel Martínez Briones<sup>1</sup>, Francisco Mestre Manrique<sup>1</sup>, Paula Molina Brotons<sup>1</sup>, Clara Ochoa Esteso<sup>1</sup>, Paola Ogando Rivas<sup>2,3</sup>, Roser Payá Pou<sup>1</sup>, Anabel Pérez López<sup>1</sup>, Natalia Piqueras García<sup>1</sup>, Alba Roselló Carrió<sup>1</sup>, María Vergara Barberán<sup>1</sup>, Miriam Beneito Cambra<sup>1</sup>, María Jesús Lerma García<sup>1</sup>, Ernesto Francisco Simó Alfonso<sup>1</sup>, Manuel Miró<sup>4</sup>, José Manuel Herrero Martínez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo CLECEM, Dpto. Química Analítica, Fac. Química, Universitat de València, 46100-Burjassot, València, España

<sup>2</sup> Instituto para el Desarrollo de la Ingeniería Alimentaria, Universitat Politècnica de València, 46022-València, España

<sup>3</sup> Universidad Autónoma de Santo Domingo, República Dominicana

<sup>4</sup> Grupo FI-TRACE, Dpto. Química, Universitat de les Illes Balears, 07122-Palma, Mallorca, España

Enrique.carrasco@uv.es, www.clecem.es, X(twitter): @CLECEM\_UV

### Abstract

Este artículo ofrece un tutorial básico sobre la fabricación de dispositivos para laboratorios de Química Analítica mediante impresión 3D, dirigido a profesionales y estudiantes que buscan incorporar esta tecnología en sus investigaciones o en sus prácticas analíticas. El tutorial abarca desde el diseño y modelado de dispositivos específicos hasta la selección de materiales compatibles con sustancias químicas, pasando por la configuración óptima de las condiciones de impresión, así como posibles modificaciones de sus propiedades a partir de distintas metodologías. Además, se proporcionan consejos para asegurar la precisión y reproducibilidad de los dispositivos fabricados, así como para resolver problemas técnicos comunes. Esta guía práctica facilita la implementación de soluciones innovadoras y personalizadas en el laboratorio, mejorando la eficiencia y flexibilidad de los procedimientos analíticos.

### 1. Introducción

La impresión 3D ha revolucionado la fabricación aditiva, impactando tanto el ámbito industrial como el doméstico, y más recientemente, el campo de la investigación, incluyendo la Química Analítica. Este auge se refleja en la creciente cantidad de revisiones bibliográficas sobre esta tecnología publicadas en los últimos 5 años [1-12]. La tecnología de impresión 3D permite a los usuarios crear objetos complejos a cualquier escala, que serían imposibles de obtener mediante otros métodos, con la ventaja adicional de ser producidos in situ, de manera rápida y a bajo coste. Esta notable versatilidad es resultado del proceso de fabricación aditiva, que consiste en la deposición sucesiva de capas de material polimérico o la fotopolimerización por capas de una resina polimérica, utilizando diversas técnicas que se detallarán más adelante. A pesar de la abundancia de manuales y recursos disponibles en la web sobre impresión 3D, y del soporte técnico que ofrecen empresas orientadas a esta tecnología, pocos de estos recursos están específicamente orientados a la fabricación de dispositivos para su uso en Química Analítica.

Este artículo tiene como objetivo proporcionar una guía básica sobre la impresión 3D aplicada a la Química Analítica, ofreciendo un tutorial que permita a los usuarios noveles incorporar esta tecnología en actividades de investigación y docencia.

### 2. Modos de impresión 3D y materiales disponibles

Cuando se habla de modos de impresión 3D, existen diversas formas de clasificar las tecnologías actuales. Sin embargo, en Química Analítica, una de las clasificaciones más utilizadas se basa en el tipo de material empleado para la fabricación del objeto 3D [10]. Desde esta perspectiva, se pueden identificar tres modos principales: modelado por deposición fundida (FDM, *fused deposition modelling*), polimerización en cubeta o estereolitografía (SL, *stereolithography*) y sinterizado selectivo por láser (SLS, *selective laser sintering*). Además, la impresión por inyección de fotopolímeros (PIP, *photopolymer inkjet printing*) es otra técnica relevante, la cual a veces se clasifica como una modalidad separada de las tres anteriores o como un submodalidad de SL. En esta guía nos enfocaremos en las dos técnicas más asequibles y disponibles en el mercado, FDM y las tres modalidades más importantes de SL.

#### 2.1. FDM

El FDM se basa en la fabricación aditiva mediante la extrusión de termoplásticos a alta temperatura, que se depositan capa por capa sobre una base (Fig. 1). Esta tecnología ha experimentado un gran avance en los últimos años, y hoy en día es posible adquirir impresoras a bajo coste que son rápidas, precisas, multimateriales y con la capacidad de realizar procesos de "Stop&Go" para incorporar piezas externas durante la impresión. Además, los objetos 3D creados mediante FDM requieren poco postprocesado para ser funcionales. No obstante, los materiales disponibles presentan algunas limitaciones, como una estabilidad limitada frente a disolventes orgánicos, superficies rugosas, y una resolución no muy elevada en los distintos ejes. Además, en este modo, la resolución de la impresión no sólo depende de la impresora, sino también de la calidad y homogeneidad del

filamento, lo que afecta la precisión de la extrusión. También, debido a que las capas en el eje Z se construyen sin enlaces covalentes entre ellas, la resistencia mecánica en este eje es baja, lo que puede generar problemas de estanqueidad a presiones medio-altas cuando se fabrican dispositivos con canales internos.

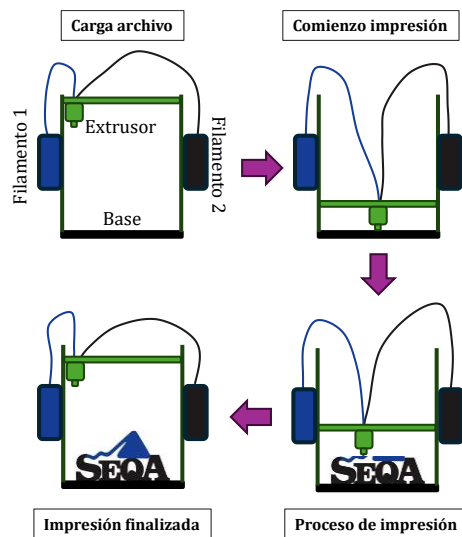


Fig. 1. Esquema de funcionamiento del modo FDM.

En cuanto a los materiales disponibles, FDM es probablemente la tecnología con mayor variedad en la actualidad. Algunas tiendas ofrecen más de 100 materiales diferentes, que incluyen opciones convencionales, resistentes, elásticas, flexibles, de alta dureza, mecanizables, porosas, recicladas, e incluso dopadas con otros materiales para proporcionar características únicas, como propiedades magnéticas o catalíticas. El ácido poliláctico (PLA) es el material más utilizado, seguido del acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). Otros materiales populares son el polipropileno (PP), tereftalato de polietilenglicol (PETG) y el alcohol polivinílico (PVA). Sin embargo, la gran variedad de materiales también presenta desafíos: no todas las impresoras son compatibles con todos los filamentos debido a las dimensiones de estos o las temperaturas necesarias para la extrusión. Además, las condiciones de impresión varían considerablemente de un material a otro, lo que requiere que el usuario optimice cada material de manera individual. Incluso filamentos aparentemente similares, pero de diferentes marcas o con distintos pigmentos, pueden necesitar ajustes específicos. Esto se puede comprobar mediante ensayos como las pruebas de tolerancia o de temperatura de extrusión que suelen estar configurados en los softwares de impresión. Por lo tanto, se recomienda a los usuarios que, una vez conozcan las condiciones óptimas de impresión, almacenen cuidadosamente los perfiles de impresión para cada material y marca específica, evitando así problemas en futuras impresiones. En cualquier caso, es importante remarcar que diseños complejos o intrincados pueden necesitar un ajuste de condiciones. Otra cuestión a tener en cuenta a la hora de realizar impresiones con múltiples materiales es la compatibilidad de condiciones entre ellos. En este sentido, se disponen dos tipos de impresoras FDM

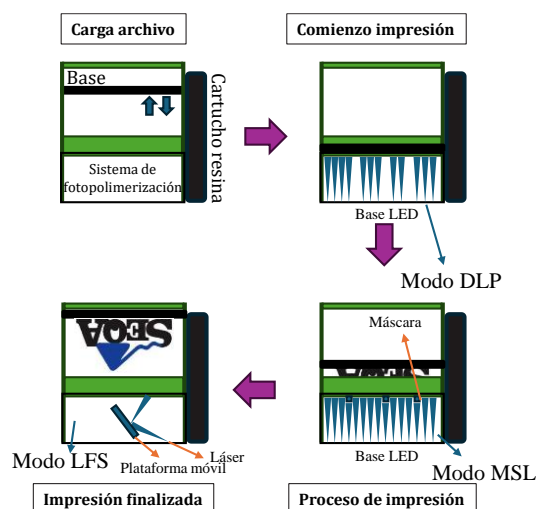
en el mercado para imprimir múltiples materiales simultáneamente, las de un único cabezal, y las de múltiples cabezales. En equivalencia, sería como en cromatografía, donde se encuentran las bombas de mezcla a alta presión, y mezcla a baja presión. En el caso de las impresoras, las impresoras de un cabezal van cambiando el material en función de la necesidad del diseño, tal y como se ha indicado anteriormente en el archivo de impresión, por lo que los materiales están conectados a un selector, y sólo cambian cuando es necesario. Esto supone que el cabezal tiene que cambiar de condiciones (incluida temperatura) para cada material. Por el otro lado, las impresoras de múltiples cabezales van usando un material u otro según la necesidad del diseño, y en este caso, los cabezales en concreto ya se encuentran en las condiciones de impresión de cada filamento. Teniendo en cuenta esto, dos materiales con condiciones muy distintas de impresión tendrán que usar impresoras con múltiples cabezales, mientras que impresiones con materiales que presenten condiciones similares podrán imprimirse incluso en impresoras de múltiples materiales que usen un mismo extrusor.

## 2.2. SL

La SL fue la primera técnica de impresión 3D en aparecer en el mercado, aunque no se popularizó tan rápidamente como el FDM debido a las restricciones impuestas por las patentes, que impidieron la liberación del código. Incluso hoy en día, no existen impresoras de SL de código abierto, a diferencia del FDM. Generalmente, cada compañía desarrolla impresoras que utilizan software específico y resinas exclusivas de esa empresa (aunque algunas resinas pueden ser compatibles entre diferentes impresoras). Además, la composición exacta de las resinas suele ser difícil de conocer, lo que añade complejidad en su uso. Dentro de la SL se encuentran diversas variantes de impresión, siendo las más destacadas el procesado de luz digital (DLP), la SL enmascarada (MSL) y la SL de baja fuerza (LFS), cuyos esquemas de funcionamiento pueden observarse en la Fig. 2. Esta figura ilustra el proceso completo de impresión en SL, diferenciando cada una de las variantes indicadas, que hasta ahora no pueden combinarse en un único sistema.

Los modos DLP y MSL emplean luces LED para provocar la fotopolimerización de una resina líquida. En estos sistemas, la base de impresión se sumerge en un tanque que contiene la resina, mientras un fondo transparente permite que la luz (generalmente en el rango del visible) atraviese y cure la resina capa por capa. Las luces LED crean cada capa construyendo píxeles, y la resolución de la impresora está directamente relacionada con el número de píxeles que puede generar. A mayor cantidad de píxeles, mayor es la resolución y, por ende, el acabado final de las piezas es más preciso. La diferencia clave entre ambos modos radica en cómo se emite la luz. En el DLP, solamente se emite luz en los píxeles que deben fotopolimerizarse, como se observa en la sección "comienzo de impresión" de la Fig. 2. Sin embargo, la MSL proyecta luz en todos los píxeles de la base, pero utiliza máscaras que bloquean aquellos que no deben fotopolimerizarse, como se muestra

en la sección "proceso de impresión". Por último, la LFS destaca por realizar la fotopolimerización (normalmente en el rango UV) no sólo capa a capa, sino también punto a punto. En este proceso, un láser, junto a una plataforma móvil, polimeriza cada punto dentro de cada capa, como se ilustra en la sección "impresión finalizada" de la Fig. 2. Este modo ofrece ventajas significativas, como una mayor resolución y precisión en la impresión final, aunque a costa de un tiempo de impresión más largo en comparación con los modos DLP y MSL.



**Fig. 2.** Esquema de funcionamiento del modo SL. En el sistema de fotopolimerización se muestra un esquema de funcionamiento de los modos DLP, MSL y LFS, que pueden verse en las partes "comienzo impresión", "proceso impresión" e "impresión finalizada", respectivamente.

El proceso de impresión en sí es relativamente sencillo, aunque el postprocesado del dispositivo impreso tiende a ser más complejo que en FDM, como se explicará más adelante. En cuanto a los materiales utilizados, la mayoría de ellos están basados en resinas de acrilato o poliácridatos, aunque también existen algunas formulaciones basadas en uretanos. No obstante, la disponibilidad de materiales es bastante limitada, y los fabricantes generalmente proporcionan poca información detallada sobre la composición de estas resinas. Debido a esta falta de información, es frecuente que sea necesario caracterizar el polímero final para poder identificar los grupos funcionales presentes en la superficie, los cuales podrían ser susceptibles de modificación en etapas posteriores. Esto es esencial cuando se requiere ajustar propiedades específicas del material o su funcionalidad para aplicaciones concretas, lo que agrega un nivel de complejidad al proceso de modificación y personalización de las piezas impresas.

### 3. Software de modelado 3D

El software de modelado para impresión 3D es una herramienta esencial para crear objetos tridimensionales que luego serán impresos. En el campo de la Química Analítica, el diseño inorgánico es especialmente relevante, ya que permite modelar estructuras rígidas y precisas, como instrumentos de laboratorio, reactores, y

componentes utilizados en experimentos. A diferencia del diseño orgánico, que se enfoca en formas fluidas y complejas, el diseño inorgánico tiende a utilizar geometrías más simples y funcionales, donde la exactitud y las líneas rectas son primordiales. Sin embargo, el diseño orgánico puede ser importante en la preparación de algún tipo de dispositivo específico.

Al elegir software de modelado para impresión 3D, es fundamental considerar factores como la facilidad de uso, la precisión en la creación de geometrías, la compatibilidad con distintos formatos de archivo (como STL y OBJ) y la capacidad de generar modelos optimizados para la impresión 3D. Algunos ejemplos populares de software incluyen *FreeCAD*, *TinkerCAD*, *Fusion 360*, y *Blender*.

*FreeCAD*, en particular, es una opción destacada, ya que es de código abierto, lo que significa que es gratuito y tiene una comunidad activa que contribuye al desarrollo de nuevas herramientas y cientos de manuales y vídeos para aprender a usarlo que se pueden encontrar en castellano. Además, su enfoque en el diseño paramétrico facilita la creación de piezas mecánicas y geométricamente precisas, esenciales en aplicaciones técnicas como las que requiere la Química Analítica. Esto lo convierte en una herramienta robusta y flexible, adecuada para quienes necesitan precisión sin incurrir en los altos costos de software comercial.

### 4. Diseño para impresión 3D

A la hora de diseñar dispositivos para Química Analítica que serán impresos en 3D, es fundamental tener en cuenta las características de cada tecnología de impresión (FDM y SL) para optimizar tanto el diseño como el rendimiento final de los dispositivos.

En FDM, el diseño debe evitar formas excesivamente complejas que requieran un uso intensivo de soportes. Los soportes pueden afectar la calidad superficial y añadir tiempo de impresión y de postprocesado. También es importante que para componentes como conectores, adaptadores o reactores que requieran precisión, es importante diseñar con tolerancias apropiadas para evitar problemas de ajuste debido a la expansión térmica del plástico durante la impresión. En FDM, hay que asegurar que las paredes de las piezas tengan un grosor mínimo de al menos 1 mm para garantizar la resistencia mecánica. Para dispositivos que manipulen líquidos o gases, se puede aumentar el grosor para evitar posibles fugas o deformaciones, aunque, en cualquier caso, es muy difícil conseguir una estanqueidad adecuada con FDM a presiones medio-altas. Los canales que transporten fluidos deben tener un diámetro mínimo de 2-3 mm para evitar bloqueos durante la impresión. También, es recomendable utilizar formas suaves y curvadas en lugar de ángulos rectos para evitar restricciones en el flujo. Asimismo, diseños que incluyan roscas o encajes para ensamblar diferentes partes, es importante diseñarlos con suficiente tolerancia. La expansión del material y la precisión de la impresora pueden afectar el ajuste. Por lo que, al menos, un margen de 0.1-0.2 mm entre las piezas que encajen entre sí será necesario.

Una de las grandes ventajas de la SL es su capacidad para producir microcanales y detalles finos. Por ejemplo, el diseño de canales para análisis en muestras líquidas o gases, estos pueden ser mucho más pequeños que en FDM. Canales de 0.5-1 mm son imprimibles con precisión, pero también se ha de tener en cuenta la limpieza y el curado posterior de dichas piezas, para evitar que queden restos de resina que puedan bloquear los canales antes de su uso. Aunque es recomendable evitar ángulos cerrados o transiciones bruscas en los canales, la impresión mediante SL es capaz de soportar diseños más complejos que la FDM. En SL, las tolerancias suelen ser precisas, pero hay que asegurarse que, si se están diseñando partes móviles o acoples, los componentes no han de estar demasiado ajustados, ya que la precisión de SL puede hacer que las piezas se impriman con menos holgura de la esperada. En cuanto a los canales internos, los canales cuadrados/rectangulares, pentagonales o circulares son más fáciles de imprimir que aquellos triangulares. Además, hay que tener en cuenta que, tras la impresión, puede quedar algo de resina no curada en los canales o cavidades, por lo que es necesario ser concienzudo con la etapa de limpieza de las zonas internas del dispositivo. Si el dispositivo tiene áreas que necesitan características específicas en la superficie, como texturización o patrones para mejorar la adherencia o el flujo de líquidos, la SL lo permite sin comprometer la resolución. También, se pueden obtener detalles superficiales excepcionales. Asimismo, es posible incluir geometrías complejas o intrincadas, como mallas o estructuras porosas, que serían difíciles de lograr con FDM. Estas son útiles en dispositivos donde se necesiten áreas de filtrado o para facilitar la entrada o salida de líquidos. Otra característica interesante es que las paredes en SL pueden ser mucho más delgadas que en FDM, lo que permite ahorrar material sin comprometer la integridad estructural. Piezas con paredes de 0.5-1 mm son viables en muchas resinas, aunque siempre es importante verificar la resistencia mecánica de la resina que se está utilizando para asegurar de que soporte las exigencias del experimental a realizar. En cualquier caso, al diseñar dispositivos para Química Analítica con impresión 3D, es importante adaptar el diseño a las características de la tecnología que se utilizará, así como a las condiciones de trabajo a las que el dispositivo se va a ver expuesto. FDM es ideal para dispositivos más grandes y robustos y que no vayan a estar en contacto con disolventes orgánicos o agresivos, a excepción de algunos materiales específicos. Por otro lado, SL permite crear piezas con detalles más finos y una mayor precisión en los canales y microestructuras, así como que presenta una mayor estabilidad química en cuanto a disolventes orgánicos o agresivos.

## 5. Selección del material e impresión 3D

En el caso de la impresión FDM, la elección del material es crucial para garantizar la durabilidad y resistencia del dispositivo. Para aplicaciones estándar, los plásticos como PLA o PETG suelen ser suficientes. Sin embargo, si el dispositivo impreso va a estar en contacto con reactivos químicos moderadamente agresivos o expuesto a altas

temperaturas, es necesario utilizar materiales más resistentes como ABS, que ofrece buena resistencia química, o PP (polipropileno), que tiene una excelente compatibilidad química, aunque puede ser más complicado de imprimir debido a su tendencia a deformarse. En casos muy específicos, donde se requiera una resistencia química excepcional, se recomienda considerar PEEK (Poliéter éter cetona) o PTFE (Teflón), aunque estos materiales son difíciles de manejar y requieren impresoras de alta gama con extrusores capaces de alcanzar temperaturas muy elevadas.

Uno de los parámetros clave en la impresión FDM es la altura de capa. Para dispositivos donde se necesita precisión, es recomendable trabajar con capas más finas (alrededor de 0.05 o 0.1 mm). Esto permitirá obtener mejores detalles en los componentes y una mayor precisión en las dimensiones, lo que es especialmente relevante cuando se imprimen piezas pequeñas o estructuras críticas como canales para líquidos o componentes de conexión. Sin embargo, es importante equilibrar la altura de capa con el tiempo de impresión, ya que capas más finas implican tiempos de impresión más largos. Para piezas menos críticas, una altura de capa de 0.2 mm o 0.3 mm puede ser suficiente. En la Fig. 3 se muestra, a modo de ejemplo, el efecto de la altura de capa en la impresión mediante FDM.

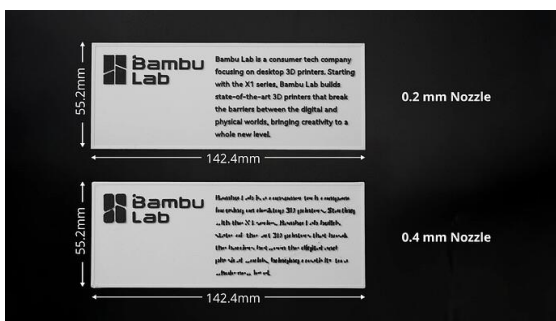


**Fig. 3.** Ejemplo de impresión a dos alturas de capa y como afecta a la impresión. Fotografías obtenidas de <http://wiki.ikaslab.org> (CC BY).

En FDM, si se requiere configurar la impresora para obtener la mayor precisión posible, especialmente para piezas pequeñas o con detalles finos, se puede trabajar con el diámetro de la boquilla. En este sentido, es posible cambiarla para ajustar el tamaño de la boquilla a las necesidades específicas (idealmente de 0.2 a 0.4 mm para detalles finos). En cualquier caso, se puede aumentar la resolución reduciendo aún más el tamaño de boquilla, pero a costa de un aumento de la presión en la extrusión y mayor posibilidad de bloqueo de la boquilla. Por otro lado, filamento que tengan mucha carga de otros materiales, como partículas magnéticas u otros componentes, es posible que requieran boquillas con mayor diámetro a 0.4 mm, para evitar obstrucciones. En la Fig. 4, se muestra un ejemplo del efecto del diámetro de la boquilla en la resolución de impresión.

Al imprimir, también hay que tener en cuenta cómo se colocará la pieza en la impresora. Las superficies que requieran mayor detalle o suavidad deben orientarse hacia arriba o evitar el contacto directo con los soportes. Los soportes son estructuras temporales esenciales para sostener partes del modelo que quedarían en el aire, como voladizos o geometrías complejas. Su función es evitar que el material fundido caiga o se deforme antes de solidificarse, mejorando así la estabilidad y calidad de la

impresión. Los soportes son especialmente importantes en ángulos superiores a 45 grados o en piezas con cavidades internas, pero pueden añadir complejidad al diseño y al proceso de impresión, ya que deben ser eliminados posteriormente, lo que puede dañar superficies delicadas o incluso romper alguna parte del dispositivo si no se hace correctamente. La elección de la densidad del soporte y su contacto con la pieza debe optimizarse para facilitar su retirada sin comprometer la calidad. Para ello, se puede optar por usar soportes, pero empleando materiales menos resistentes que puedan eliminarse con disolventes o agua, y que ello no afecte al material del dispositivo principal. Por ejemplo, es posible utilizar materiales solubles, como alcohol de polivinilo, que se disuelven en agua fácilmente sin afectar a la zona donde se apoyaba el dispositivo impreso. Si se quieren realizar canales internos, es crucial ubicar los soportes lejos ya que su eliminación puede ser muy compleja o imposible. Para minimizar su uso, es útil ajustar la orientación del modelo o dividirlo en piezas ensamblables.



**Fig. 4.** Ejemplo del efecto del tamaño de boquilla en la impresión 3D.

Un último aspecto importante, es asegurarse de que la pieza esté diseñada de forma que las tensiones generadas durante la impresión no provoquen deformaciones indeseadas. Esto es particularmente importante en materiales como ABS, que tienden a deformarse más fácilmente.

En la impresión 3D mediante SL, la elección del material es fundamental para garantizar que el dispositivo fabricado cumpla con los requisitos necesarios para su aplicación. Las resinas más comunes en SL suelen estar basadas en acrilatos o poliuretanos, y aunque son adecuadas para muchas aplicaciones, tienen una resistencia limitada a ciertos reactivos químicos. Para aplicaciones donde se espera contacto con sustancias más agresivas, puede ser necesario utilizar resinas especializadas, como las que ofrecen una mayor resistencia química o térmica. Sin embargo, estas resinas suelen ser más costosas y complejas de procesar. Además, es importante tener en cuenta que la disponibilidad de información detallada sobre la composición de las resinas puede ser limitada, lo que obliga a los usuarios a caracterizar el material tras la impresión para asegurarse de que sea compatible con sus necesidades específicas. Por ello, una recomendación importante para este tipo de resinas es hacer estudios de compatibilidad de piezas impresas básicas (simples cubos, por ejemplo) con los disolventes o reactivos que se van a emplear y evaluar si se observa deterioro o cambios en la

estructura impresa antes de seleccionar esa resina para estudios posteriores.

Un aspecto crucial de la impresión SL es el diseño de canales internos y detalles finos. Gracias a la alta precisión que ofrece la tecnología SL, es posible crear geometrías complejas y microestructuras con un nivel de detalle que sería difícil de alcanzar con otras tecnologías como FDM. Esto es especialmente importante en dispositivos mili/microfluídicos, donde se requiere precisión en elementos como microcanales para el transporte de fluidos o cámaras de reacción en sistemas de análisis. Sin embargo, se debe tener especial cuidado en el diseño de estos canales, ya que, si son demasiado pequeños o intrincados, pueden quedar restos de resina líquida sin curar dentro de ellos, lo que complicaría su limpieza o incluso afectaría el funcionamiento del dispositivo.

La orientación de la pieza durante la impresión es otro factor clave que afecta tanto la calidad final como la necesidad de soportes en SL. A diferencia de FDM, donde el material fundido necesita soportes para evitar que se caiga en ciertas áreas, en SL la resina líquida que no ha sido curada proporciona un cierto soporte temporal. No obstante, las piezas que contienen voladizos o geometrías muy complejas seguirán necesitando soportes adicionales para evitar que la gravedad afecte la precisión del curado. La orientación de la pieza puede influir directamente en la calidad superficial y en la precisión de los detalles. Las superficies que se orientan directamente hacia la fuente de luz (en los modos de impresión DLP o MSLA) o hacia el láser (en LFS) suelen tener un mejor acabado. Por ello, es recomendable orientar las superficies más críticas del dispositivo, como los conductos internos o las zonas de sellado, de manera que no requieran soportes, ya que su retirada podría afectar la integridad del diseño. Orientar adecuadamente las piezas también puede reducir el uso de soportes y el riesgo de deformaciones o imperfecciones en áreas importantes.

En el caso de dispositivos con canales internos o cavidades complejas, es especialmente importante prestar atención a la orientación. Si los canales se colocan en una dirección que los deja expuestos a la necesidad de soportes internos, puede ser muy difícil retirarlos una vez completada la impresión, lo que comprometería el funcionamiento del dispositivo. En el caso de que se quieran imprimir canales de dimensiones muy pequeñas, una opción para eliminar problemas de polimerización cruzada que cierren los canales durante la impresión es posicionar la pieza de manera que los canales se queden muy cerca de la última parte impresa y que la pared final sea de poco grosor, aunque permita aplicar menos presión que si las paredes tuviesen un grosor más alto.

Aunque los soportes en SL no son tan necesarios como en FDM, su correcta utilización es esencial para obtener piezas de alta calidad sin defectos estructurales. En SL, los soportes son más delgados y fáciles de retirar que en FDM, ya que la gravedad tiene un menor efecto sobre la resina líquida durante el proceso de curado. No obstante, deben colocarse con cuidado, ya que, si se adhieren a superficies delicadas o a partes funcionales del dispositivo, como microcanales, pueden dejar marcas o dañar las estructuras. Una buena práctica es ajustar la densidad de

los soportes en función de la complejidad de la pieza. Para áreas con voladizos significativos o donde la precisión sea esencial, se recomienda utilizar soportes más densos, pero con una conexión ligera a la pieza para facilitar su eliminación posterior. Las zonas críticas, como los bordes de las cámaras o las entradas y salidas de los canales, deben quedar libres de soportes para garantizar una calidad óptima.

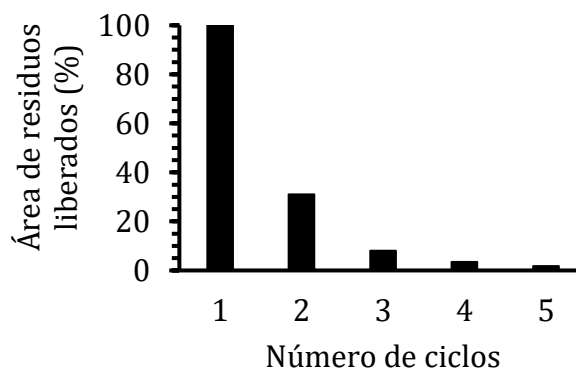
Al igual que en FDM, la elección de la altura de capa en SL influye directamente en la calidad y precisión del dispositivo impreso. SL permite trabajar con capas extremadamente finas, en el rango de 25 a 100  $\mu\text{m}$ , lo que resulta en un nivel de detalle y suavidad superficial mucho mayor que en FDM. Para dispositivos en aplicaciones analíticas, donde la precisión es crucial, como en la fabricación de microreactores, sistemas mili/microfluídicos o sistemas de dosificación de fluidos, es recomendable utilizar capas finas para obtener un acabado más preciso y detalles más nítidos. Sin embargo, es importante encontrar un equilibrio entre la calidad deseada y el tiempo de impresión. Cuanto más fina sea la capa, mayor será el tiempo necesario para completar la impresión.

## 6. Postprocesado de impresión 3D

En la impresión 3D mediante FDM, el postprocesado es relativamente sencillo, consistiendo principalmente en la eliminación de soportes y, en algunos casos, en el suavizado de la superficie del dispositivo. Este último se puede lograr mediante el uso de acetona, vapores de acetona o lijado manual, dependiendo del acabado superficial deseado. Aunque existen otros métodos de suavizado más avanzados, estos son los más comúnmente utilizados. Cabe destacar que algunos materiales específicos pueden requerir técnicas de postprocesado particulares, que suelen estar indicadas por el fabricante del filamento.

Por otro lado, en la SL, el postprocesado adquiere una mayor importancia, especialmente cuando se trata de dispositivos destinados a aplicaciones en Química Analítica. La naturaleza viscosa de la resina líquida provoca que, tras la impresión, se adhiera a la superficie del dispositivo y quede atrapada en los canales o cavidades internas. Para evitar esto, es crucial seguir las recomendaciones del fabricante, que normalmente sugieren limpiar el dispositivo con un alcohol de cadena corta, como el 2-propanol, para eliminar la resina no polimerizada seguido de un curado en cámara con radiación UV durante un tiempo de al menos 2 h. La limpieza de dispositivos impresos mediante SL para aplicaciones analíticas ha de ser mucho más rigurosa que para usos domésticos o no críticos. En Química Analítica, es esencial minimizar o eliminar cualquier liberación de sustancias residuales de la resina, ya que estas podrían interferir con los análisis o afectar la detección del analito de interés. Esto es particularmente relevante cuando los dispositivos entran en contacto con disolventes orgánicos o reactivos agresivos. Un enfoque efectivo es realizar varios ciclos de limpieza para reducir significativamente los oligómeros y otros compuestos residuales que podrían

liberarse. Como se observa en la Fig. 5, tras tres ciclos de limpieza (siguiendo un protocolo descrito en bibliografía [13]) en un cubo de  $2 \times 2 \times 2$  mm (impreso con resina Clear en una Form3), se logró eliminar aproximadamente el 92% de los compuestos residuales detectados después del primer ciclo, utilizando un sistema de cromatografía de líquidos acoplado a un detector UV-visible.



**Fig. 5.** Área de residuos liberada, en un dispositivo cúbico de  $2 \times 2 \times 2$  impreso mediante SL, en función del número de ciclos de limpieza siguiendo el protocolo descrito en [13]. El área de residuos (en porcentaje) expresa la relación de áreas de los picos de residuos obtenidos en cada ciclo respecto al primer ciclo de limpieza. Monitorización de residuos mediante cromatografía de líquidos con detector UV-visible.

Este proceso subraya la necesidad de realizar estudios previos de limpieza para cada tipo de dispositivo, ya que no solamente el material de la resina afecta la liberación de compuestos, sino también al propio diseño del dispositivo. Así pues, será necesario optimizar factores como los disolventes utilizados, el tiempo de contacto, el uso de ultrasonidos y la duración del curado en cámara UV, junto con el número de ciclos de limpieza, para asegurar que el dispositivo esté completamente limpio y no interfiera en las aplicaciones analíticas posteriores.

## 7. Aplicaciones de impresión 3D en Química Analítica

La impresión 3D ha transformado áreas clave de la Química Analítica, como la preparación de muestra, las técnicas de separación, y el desarrollo de sensores y detectores, permitiendo la creación de dispositivos personalizados que optimicen los procesos analíticos. En la preparación de muestra, uno de los primeros trabajos sobre el uso de impresión 3D para la extracción en fase sólida (SPE) fue desarrollado por Su *et al.*, quienes diseñaron un preconcentrador impreso para la determinación de elementos traza [14]. Desde entonces, se han fabricado numerosos dispositivos 3D para manipular muestras y realizar extracciones eficientes. Estos dispositivos destacan por su capacidad de personalización, que facilita la fabricación de módulos con formas y estructuras adaptadas a las necesidades de cada análisis. Esto ha mejorado significativamente el rendimiento en métodos de extracción como SPE y microextracción en fase sólida (SPME), donde los sorbentes impresos en 3D

presentan un control geométrico mejorado sobre la estructura del material, lo que favorece la eficacia en la retención y liberación de los analitos [15;5].

Asimismo, la impresión 3D ha permitido integrar membranas porosas directamente en dispositivos, lo que optimiza la extracción de compuestos a partir de muestras complejas. Las membranas impresas pueden actuar como barreras selectivas, permitiendo el paso de analitos según sus características químicas, mejorando así la selectividad y eficiencia de los procesos analíticos [16].

En cuanto a técnicas de separación cromatográficas, la impresión 3D ha facilitado la creación de columnas cromatográficas personalizadas y estructuras monolíticas con morfologías controladas. Dimartino y colaboradores, en un estudio seminal, demostraron cómo se pueden imprimir fases estacionarias con geometrías precisas que mejoran el rendimiento en cromatografía líquida [7]. Estas estructuras, que incluyen partículas monodispersas y columnas de alta resolución, permiten optimizar la separación de analitos complejos gracias a un mayor control sobre la porosidad y el área superficial.

Además, la impresión 3D ha sido clave en el desarrollo de dispositivos para electroforesis capilar y otros métodos eléctricos de separación. La posibilidad de imprimir interfaces personalizadas entre sistemas de electroforesis y detección masiva ha mejorado la versatilidad de estos dispositivos, haciéndolos más accesibles para la personalización en laboratorio [8]. Estos avances permiten un control preciso sobre los parámetros de separación y un rendimiento optimizado en la detección de analitos.

En el área de los sensores y detectores, la impresión 3D ha permitido integrar tecnologías de detección electroquímica y óptica directamente en dispositivos impresos, creando plataformas portátiles y de bajo costo para la detección *in situ*. La fabricación de celdas de flujo y electrodos impresos ha facilitado el desarrollo de sensores electroquímicos con geometrías personalizadas, capaces de detectar una amplia gama de analitos en diversas matrices [17;18]. Además, las técnicas de detección óptica se han beneficiado de la impresión 3D, con la integración de fibras ópticas y la creación de dispositivos optofluídicos capaces de realizar análisis con espectrofotometría y fluorescencia [19].

## 8. Conclusiones

Desde su introducción en los años 80, la impresión 3D ha sido aplicada en múltiples disciplinas, incluida la Química Analítica, donde su crecimiento es evidente por el número creciente de publicaciones en revistas especializadas. Una de las razones de su popularidad es su capacidad de superar las técnicas convencionales de fabricación, proporcionando la posibilidad de crear dispositivos con geometrías complejas y múltiples materiales en un solo paso y a un coste reducido.

La optimización de las condiciones de impresión, la selección adecuada de los materiales y la elección de la tecnología correcta son aspectos clave para asegurar el éxito en la fabricación de dispositivos mediante impresión 3D, especialmente en aplicaciones de Química Analítica. Cada tecnología de impresión ya sea FDM o SL, presenta

ventajas y limitaciones específicas que deben tenerse en cuenta en función de los requisitos del dispositivo. El FDM, por ejemplo, permite una amplia variedad de materiales y es adecuado para piezas robustas, aunque puede presentar desafíos en cuanto a resolución y resistencia química. En cambio, la SL ofrece una mayor precisión y capacidad para imprimir detalles finos y microcanales, pero requiere un postprocesado más cuidadoso, especialmente para eliminar resina no curada. Además, la compatibilidad química de los materiales con los reactivos utilizados en análisis es fundamental, por lo que es esencial realizar estudios previos de estabilidad y de limpieza y curado. La correcta orientación de la pieza, la selección del diámetro de boquilla en FDM o la densidad de los soportes en SL son decisiones críticas que influyen directamente en la funcionalidad y precisión del dispositivo final. Optimizar estos parámetros no sólo garantiza un mejor rendimiento del dispositivo impreso, sino que también reduce costes, tiempos de impresión y la necesidad de modificaciones posteriores, haciendo que la tecnología sea más eficiente y adaptable a diversas aplicaciones analíticas.

Un aspecto destacado de la impresión 3D es su capacidad para mejorar los métodos analíticos estándar y abrir nuevas soluciones para el desarrollo de procedimientos innovadores. En particular, en el ámbito de la preparación de muestra, técnicas de separación y dispositivos sensores. Sin embargo, es ineludible que en los próximos años surjan nuevas aplicaciones que revolucionen distintos campos en aplicaciones en Química Analítica.

El futuro de la impresión 3D en Química Analítica se dirige hacia un mayor desarrollo de nuevos materiales compuestos con propiedades fisicoquímicas mejoradas y la impresión multimaterial. Además, la tecnología emergente de impresión 4D, que implica el uso de materiales que cambian de forma o propiedades en función de estímulos externos, promete ampliar aún más las aplicaciones en este campo. En resumen, la impresión 3D ha abierto un vasto horizonte de posibilidades en Química Analítica, desde la mejora de los métodos convencionales hasta el desarrollo de nuevas soluciones personalizadas. El continuo desarrollo de materiales y técnicas avanzadas, junto con la creciente comprensión de los principios de la impresión 3D, sugiere un futuro lleno de promesas para la aplicación de esta tecnología en la investigación y práctica analítica.

**¡El límite está en tu imaginación!**

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Agencia Estatal de Investigación de España (AEI//10.13039/501100011033/), el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España (MICIU) y la Unión Europea (NextGenerationEU/PRTR) a través de los proyectos PID2021-125459OB-I00, PID2020-117686RB-C33 y TED2021-131303B-I00. Asimismo, los autores agradecen los proyectos CIGE/2023/069 y CIAICO/2022/183 financiados por la Generalitat Valenciana. Los autores expresan su agradecimiento al MICINN por la concesión de la Red de Excelencia en

Preparación de Muestras (RED2022-134079-T). Los autores son miembros del Grupo de Estudio y Red de Preparación de Muestras de la UE, apoyados por la División de Química Analítica de la Sociedad Química Europea. Este estudio forma parte del programa de Materiales Avanzados y ha sido apoyado por el MCIN con financiación de la Unión Europea NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) y por la Generalitat Valenciana.

## Referencias

- [1] P.N. Nesterenko, 3D printing in analytical chemistry: current state and future, *Pure Appl. Chem.* 92 (2020) 1241-1355. <https://doi.org/10.1515/pac-2020-0206>
- [2] H. Agrawaal, J.E. Thompson, Additive manufacturing (3D printing) for analytical chemistry, *Talanta* 3 (2021) 100036. <https://doi.org/10.1016/j.talo.2021.100036>.
- [3] F. Li, M. Rodas Ceballos, S.K. Balavandy, J. Fan, M.M. Khataei, Y. Yamini, F. Maya, 3D Printing in analytical sample preparation, *J. Sep. Sci.* 43 (2020) 1854-1866. <https://doi.org/10.1002/jssc.202000035>
- [4] K. Duangjaiboon, M. Kitiwan, P.R. Kaewpengkrow, Co-pelletization of Industrial Sewage Sludge and Rice Straw: Characteristics and Economic Analysis, *Int. J. Renew. Energy Dev.* 10 (2021) 653-662. <https://doi.org/10.14710/ijred.2021.33834>
- [5] S.A. Monteiro, C. Scheid, M. Deon, J. Merib, Fundamentals, recent applications, and perspectives of 3D printing in sample preparation approaches, *Microchem. J.* 195 (2023) 109385. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.109385>
- [6] Q. Zhu, C. Liu, S. Tang, W. Shen, H.K. Lee, Application of three dimensional-printed devices in extraction technologies, *J. Chromatogr. A* 1697 (2024) 463987. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2023.463987>
- [7] C. Salmean, S. Dimartino, 3D-Printed Stationary Phases with Ordered Morphology: State of the Art and Future Development in Liquid Chromatography, *Chromatographia* 82 (2019) 443-463. <https://doi.org/10.1007/s10337-018-3671-5>
- [8] M. Grajewski, M. Hermann, R.D. Oleschuk, E. Verpoorte, G.IJ. Salentijn, Leveraging 3D printing to enhance mass spectrometry: A review, *Anal. Chim. Acta* 1166 (2021) 338332. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.338332>
- [9] K. Griffin, D. Pappas, 3D printed microfluidics for bioanalysis: A review of recent advancements and applications, *TrAC, Trends Anal. Chem.* 158 (2023) 116892. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116892>
- [10] E.J. Carrasco-Correa, E.F. Simó-Alfonso, J.M. Herrero-Martínez, M. Miró, The emerging role of 3D printing in the fabrication of detection systems, *TrAC, Trends Anal. Chem.* 136 (2021) 116177. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.116177>
- [11] L.C. Duarte, F. Figueredo, C.L.S. Chagas, E. Cortón, W.K.T. Coltro, A review of the recent achievements and future trends on 3D printed microfluidic devices for bioanalytical applications, *Anal. Chim. Acta* 22 (2024) 342429. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.342429>
- [12] A.A. Paul, A.D. Aladese, R.S. Marks, Additive manufacturing applications in biosensors technologies, *Biosensors* 14 (2024) 60. <https://doi.org/10.3390/bios14020060>
- [13] E.J. Carrasco-Correa, D.J. Cocovi-Solberg, J.M. Herrero-Martínez, E.F. Simó-Alfonso, M. Miró, 3D printed fluidic platform with in-situ covalently immobilized polymer monolithic column for automatic solid-phase extraction, *Anal. Chim. Acta* 1111 (2020) 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2020.03.033>
- [14] C.K. Su, P.J. Peng, Y.C. Sun, Fully 3D-printed preconcentrator for selective extraction of trace elements in seawater, *Anal. Chem.* 87 (2015) 6945-6950. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.analchem.5b01599>
- [15] D.J. Cocovi-Solberg, P.J. Worsfold, M. Miró, Opportunities for 3D printed millifluidic platforms incorporating on-line sample handling and separation, *TrAC, Trends Anal. Chem.* 108 (2018) 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.08.007>
- [16] H.K. Balakrishnan, E.H. Doeven, A. Merenda, L.F. Dumée, R.M. Guijt, 3D printing for the integration of porous materials into miniaturised fluidic devices: A review, *Anal. Chim. Acta* 1185 (2021) 338796. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.338796>
- [17] H.H. Hamzah, S.A. Shafiee, A. Abdalla, B.A. Patel, 3D printable conductive materials for the fabrication of electrochemical sensors: A mini review, *Electrochem. Commun.* 96 (2018) 27-31. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2018.09.006>
- [18] R.M. Cardoso, C. Kalinke, R.G. Rocha, P.L. Dos Santos, D.P. Rocha, P.R. Oliveira, B.C. Janegitz, J.A. Bonacin, E.M. Richter, R.A.A. Munoz, Additive-manufactured (3D-printed) electrochemical sensors: A critical review, *Anal. Chim. Acta* 1118 (2020) 73-91. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2020.03.028>
- [19] A. Lambert, S. Valiulis, Q. Cheng, Advances in Optical Sensing and Bioanalysis Enabled by 3D Printing, *ACS Sens* 3 (2018) 2475-2491. <https://doi.org/10.1021/acssensors.8b01085>