



Propuesta didáctica: Fabricación de Dispositivos de Microfluídica mediante Litografía Suave de Bajo Costo

Laura Adriana Oropeza Ramos
Carina Chávez Granados
Oscar Pilloni Choreño

Objetivo didáctico general

Validar un microdispositivo de bajo costo para resolver una necesidad concreta.

Objetivo específico:

Diseñar y fabricar un microdispositivo a través de la litografía suave con moldes de poliestireno termoplástico, aplicando principios de física, química de polímeros y diseño asistido por computadora para resolver un problema básico de ingeniería biomédica, con un enfoque interdisciplinario.

Recurso desarrollado para el proyecto *IT100922 Desarrollo de plataformas portátiles con base en microfluídica de microgotas para detección de patógenos*, con el apoyo del programa UNAM - DGAPA - PAPIIT

"Propuesta Didáctica: Fabricación de Dispositivos de Microfluídica mediante Litografía Suave de Bajo Costo", Laura Oropeza-Ramos, Carina Chávez Granados, Oscar Pilloni, D. R., ©, 2025, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3000, Universidad Nacional Autónoma de México, C.U., Delegación Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México.

Esta obra está bajo una licencia Creative Commons Atribución, No comercial Código Legal: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.es>, (CC-BY-NC).

D. R.©, 2025, UNAM- CC-BY-NC-ND

Índice

1. MARCO TEÓRICO	4
1.1. LITOGRAFÍA SUAVE.....	4
1.2. MÉTODOS PARA FABRICACIÓN DE MOLDES MICROESTRUCTURADOS	5
2. FUNDAMENTACIÓN DIDÁCTICA.....	9
3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE APRENDIZAJE CENTRADOS EN EL DESARROLLO DE COMPETENCIAS.	11
4. ACTIVIDADES DE LA PROPUESTA DIDÁCTICA (SECUENCIA DIDÁCTICA - METODOLOGÍA ABPJ).....	13
5. CRITERIOS TÉCNICOS DE EVALUACIÓN.....	18
6. REFERENCIAS.....	19
7. ANEXO A. FABRICACIÓN DE MOLDES DE POLIESTIRENO TERMOPLÁSTICO <i>SHRINKY DINKS</i>	21
8. ANEXO B. FABRICACIÓN DEL DISPOSITIVO MICROFLUÍDICO POR LITOGRAFÍA SUAVE	24

Datos Generales

- **Asignaturas sugeridas:** BioMEMS y dispositivos Lab on a Chip, Instrumentación Biomédica, Temas Selectos de Ingeniería Eléctrica Electrónica, Introducción a la tecnología MEMS, Temas Selectos de Ingeniería Biomédica.
- **Institución:** Facultad de Ingeniería, UNAM
- **Destinatarios:** Profesorado en áreas de micro y nano tecnología y bioingeniería
- **Nivel:** Licenciatura (semestres sexto-noveno)
- **Duración estimada: 4 sesiones de laboratorio** (2-3 horas cada una). *Aclaración temporal:* Aunque el trabajo efectivo en el laboratorio es de 4 sesiones, **el estudiantado** debe considerar que los tiempos pasivos de curado y preparación pueden extender el ciclo total del proyecto.

1. Marco Teórico

1.1. Litografía suave

Uno de los avances más significativos para el desarrollo de la microfluídica fue la implementación y mejora de la litografía suave y el uso del Polidimetilsiloxano (PDMS, por sus siglas en inglés) como material base para crear prototipos rápidos a microescala.

La litografía suave se refiere a un conjunto de técnicas basadas en la impresión, estampado y moldeo de réplicas, para crear micro y nano estructuras tridimensionales utilizando polímeros. En la figura 1 podemos observar proceso común de litografía suave: el moldeo de réplicas que consiste principalmente en lo siguiente:

Sobre un molde, que puede o no ser creado mediante técnicas de fotolitografía, se vierte un polímero líquido, el cual posteriormente pasa por un proceso de curado o polimerización que se puede acelerar empleando calor. Posteriormente, se extrae el polímero rígido que contiene una réplica casi exacta de la forma y tamaño del molde. El polímero más utilizado es el PDMS, debido a que posee propiedades como elasticidad, biocompatibilidad, transparencia óptica, aislamiento térmico, permeabilidad a gases (particularmente oxígeno), e inerte químicamente (Zhao et al., 1997). Algunas de las características principales del PDMS las podemos observar en la tabla 1. Estas características son importantes para la fabricación de sistemas microelectromecánicos enfocados en biología, biomedicina y medicina (BioMEMS), debido a que este polímero no tóxico puede entrar en contacto con seres vivos, permitiendo por ejemplo el crecimiento de células de mamíferos. Es transparente a la luz visible por lo que las muestras pueden ser analizadas bajo microscopio, permeable a gases y solventes orgánicos no polares.

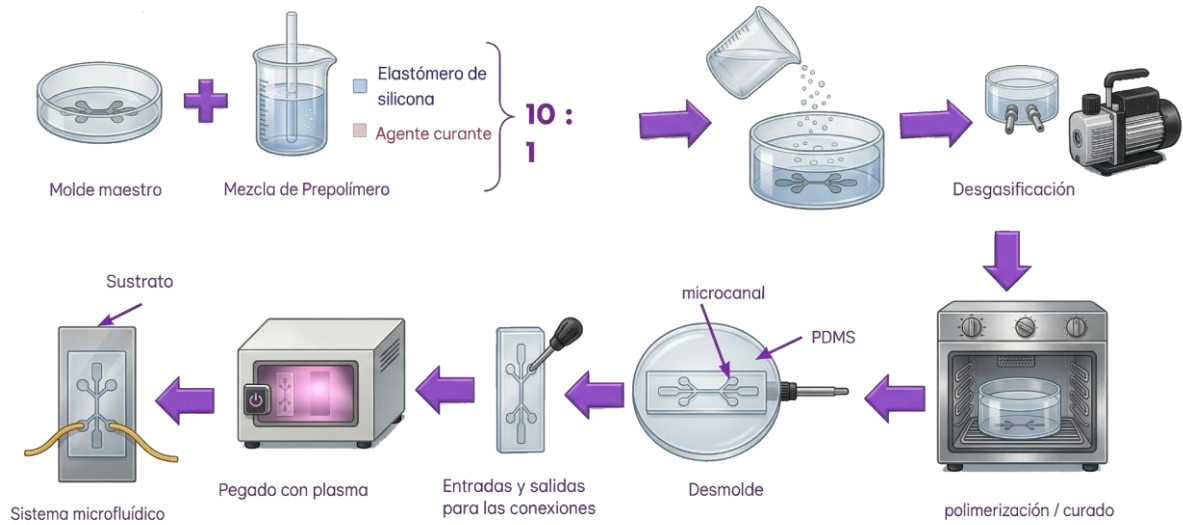


Figura 1. Proceso de Litografía suave por moldeo de réplicas (fuente: elaboración propia).

Tabla 1. Principales características del PDMS (Tuomikoski, 2007).

PDMS	Propiedades Térmicas		Propiedades Ópticas	
	Temperatura de degradación [°C]	Coefficiente de expansión térmica (CTE) [ppm/°C]	UV-Transparencia	Transparencia a la luz visible
	>400	310	>230 [nm]	buena
	Permeabilidad		Toxicidad	
	Baja permeabilidad a líquidos; permeable a gases y a solventes orgánicos no polares.		No tóxico; Se puede implantar en seres vivos; permite el crecimiento de células mamíferas.	

1.2. Métodos para fabricación de moldes microestructurados

Un molde micro estructurado puede ser fabricado a partir de diferentes materiales, tales como latón, aluminio, silicio, resinas fotosensibles, etc. Dependiendo del material y la resolución necesaria se pueden emplear diversas técnicas, como por ejemplo las discutidas a continuación (ver figura 2).

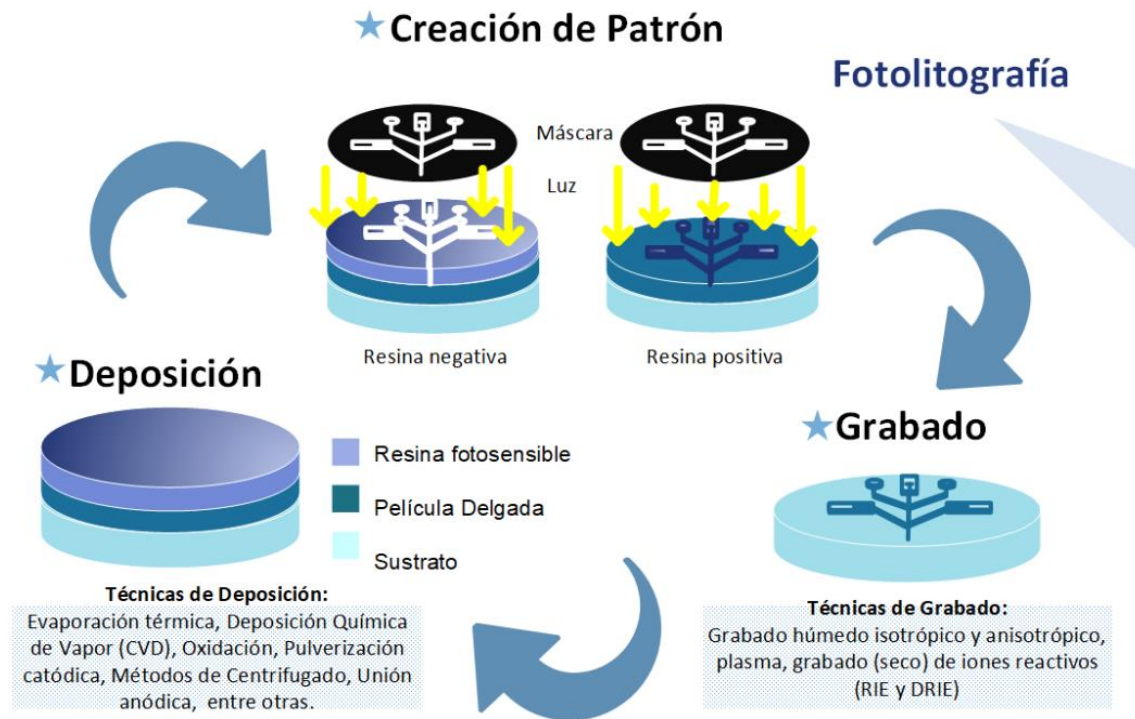


Figura 2. Principales etapas del proceso de fabricación de moldes (fuente: elaboración propia).

Para el caso en el que se emplea silicio como sustrato (obleas), se requieren diferentes etapas como las que se enlistan a continuación:

- **Depósito de películas delgadas.** Muchos procesos en microtecnología involucran la deposición consecutiva de películas delgadas de algún material.
- **Transferencia del patrón.** Los micro dispositivos se forman por patrones definidos, la transferencia de patrones involucra dos partes: un proceso óptico (litografía óptica) y un proceso químico donde la resina fotosensible es removida.
- **Grabado.** En esta etapa se remueve selectivamente material de las áreas delimitadas por la resina fotosensible. Un método empleado es la aplicación de plasma figura 2, o puede ser mediante abrasión química.

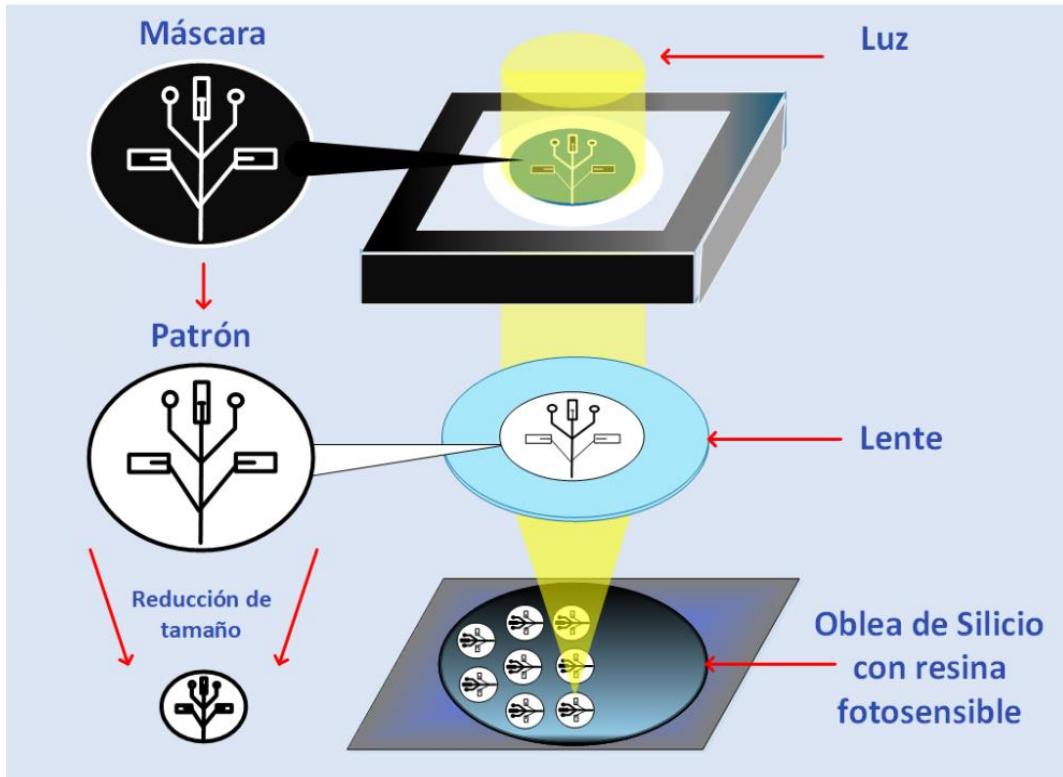


Figura 3. Proceso de litografía óptica. Se deposita resina fotosensible sobre el sustrato, posteriormente se coloca la máscara sobre la resina y se exponen a luz UV, la remoción de la resina expuesta da como resultado el patrón mostrado (fuente: elaboración propia).

La litografía óptica se refiere a la transferencia de un patrón a un material fotosensible por medio de la exposición selectiva de una fuente de radiación o luz, involucra tres pasos secuenciales: la aplicación de una capa de resina sensible a la radiación ultravioleta sobre el sustrato mediante bases giratorias (método *Spin coating*) en donde se hace girar a altas velocidades el sustrato con la resina líquida depositada en la superficie, con el fin de esparcir uniformemente el material por fuerza centrífuga. Posteriormente, el diseño (patrón a transferir) plasmado sobre una base de cromo con partes transparentes y partes oscuras, la cual servirá como máscara para el molde, se transfiere al sustrato por medio de la exposición de esta máscara a luz ultravioleta (UV). La máscara permite el paso selectivo de la luz UV (ver figura 3).

La resina expuesta a la luz UV cambia sus propiedades, lo cual permite que, al realizarse la inmersión del sustrato con la resina fotosensible en un revelador acuoso, se disuelve la resina expuesta (resina positiva) o no expuesta (resina negativa) a la luz UV (Maluf & Williams, 2004;

Madou, 2018). Para esta técnica es necesario el uso de cuartos limpios y equipo sofisticado de alta precisión. El resultado en cuanto a las réplicas es preciso; sin embargo, es un procedimiento costoso.

Recientemente se cuenta con métodos alternativos no basados en fotolitografía para la generación de un molde. En el 2001, Tan et. al. probaron una técnica alternativa para generar moldes a través de fotocopiar diseños sobre acetatos convencionales (Tan et al., 2001). Con la deposición de tinta de carbono sobre este acetato se lograban generar canales de 8 a 14 μm ; sin embargo, tenía la desventaja de que no era posible generar canales con mayor profundidad. Este tipo de canales superficiales puede ser adecuado para muchas aplicaciones en microfluídica, pero no para su uso con células de mamíferos con un diámetro mayor a 10 μm .

En el 2007, Michelle Khine et. al. emplearon hojas de poliestireno termoplástico (PST) que de manera comercial se conocen como *Shrinky-Dinks*, utilizado como juguete para la infancia, el cual puede reducir su tamaño original aproximadamente un 63% en ancho y largo, mientras que se incrementa la altura de la zona impresa por encima del 500% después de ser expuesto de 3 a 5 minutos a más de 160°C, como se ilustra en la figura 4 (Grimes et al., 2008).

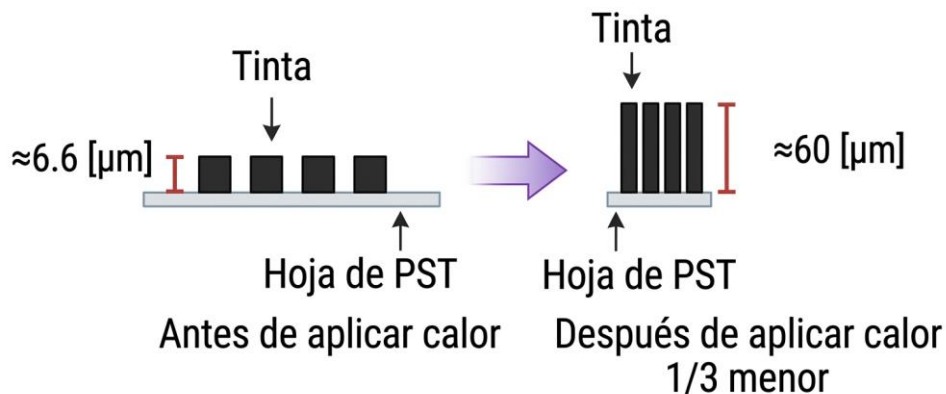


Figura 4. Vista lateral de aumento de la tinta y la reducción del molde en 1/3 de su tamaño original (fuente: elaboración propia).

2. Fundamentación Didáctica

Esta propuesta se rige bajo el **Aprendizaje Basado en Proyectos (ABPj)**. El profesorado debe actuar como guía y facilitador, planteando un reto auténtico donde el alumnado construya el conocimiento mediante el diseño, fabricación y validación de un microdispositivo. Se fomenta la resolución de problemas en tiempo real (*troubleshooting*) y la interdisciplinariedad entre física, química y biología, a través del diseño de una propuesta de solución, la elaboración de un producto concreto y la socialización de resultados. En este enfoque, el papel del docente consiste en orientar, retroalimentar y acompañar el proceso, mientras que el estudiantado asume un rol protagónico en la toma de decisiones, la investigación, el diseño, la fabricación y la evaluación del dispositivo.

El proyecto se articula alrededor del reto formativo de diseñar, fabricar y validar un microdispositivo de bajo costo mediante litografía suave con moldes de poliestireno termoplástico, capaz de responder a una necesidad microfluídica específica. A partir de este reto, el estudiantado usa conocimientos de BioMEMS y dispositivos Lab on a Chip, en específico: ciencia de materiales, diseño asistido por computadora, bioingeniería y caracterización experimental, para desarrollar una solución funcional y argumentada.

Este planteamiento responde a los criterios de las metodologías activas de aprendizaje, en tanto promueve la participación activa del estudiantado, el trabajo colaborativo, la integración de saberes, la resolución de problemas auténticos y la producción de evidencias de aprendizaje vinculadas con una tarea significativa. Asimismo, favorece la reflexión sobre el proceso seguido, los errores de fabricación, las decisiones de diseño y la relación entre la geometría del dispositivo y su desempeño microfluídico.

Adicionalmente, la propuesta incorpora el uso de tecnologías digitales como parte constitutiva del proceso formativo. Entre ellas se incluyen herramientas de diseño CAD para la elaboración del patrón del dispositivo, recursos digitales para búsqueda y análisis de información científica, hojas de cálculo o software de análisis para registrar y procesar datos experimentales, medios audiovisuales para documentar el proceso de fabricación y plataformas digitales para la comunicación y presentación de resultados. El uso de estas herramientas no se plantea como

complemento, sino como parte del entorno de trabajo propio de la práctica contemporánea en microtecnología.

Desde esta perspectiva, la fabricación de microdispositivos mediante litografía suave de bajo costo deja de presentarse únicamente como una práctica guiada de laboratorio y se convierte en un proyecto integrador, en el que el estudiantado aprende a diseñar, experimentar, evaluar, corregir y comunicar una solución tecnológica concreta. La propuesta se basa en los siguientes pilares:

- **Enfoque liderado por el estudiantado** (Morton & Bridle, 2016): fomenta la resolución de problemas y el *troubleshooting* en tiempo real, aumentando la motivación y el compromiso.
- **Litografía suave con moldes de poliestireno** (Grimes et al., 2008; Castillo Rendón & Ortiz Guadarrama, 2013): el uso de láminas de poliestireno termoplástico (*Shrinky Dinks*) y la contracción inducida por calor permite generar microcanales con las siguientes características:
 - **Profundos** (hasta 80 μm): ideales para ensayos con células mamíferas o ensayos bioquímicos.
 - **Redondeados**: mejoran las propiedades de flujo y reducen esfuerzos, a diferencia de los canales de sección transversal rectangular creados con fotolitografía.
- **Interdisciplinariedad**: la microfluídica es un campo inherentemente interdisciplinario que combina conceptos de física, química, ciencia de materiales, biología e ingeniería. Las actividades prácticas permiten al alumnado conectar ideas de un campo con otro, preparándose para desafíos profesionales o de investigación y desarrollo tecnológico que trascienden las fronteras de una sola disciplina (Rackus et al., 2019). El proyecto promueve una comprensión integral del ciclo de diseño y fabricación, demostrando que la innovación en bioingeniería es accesible.
- **Metodología de Bajo Costo (*Cleanroom-Free*)**: la fabricación de microdispositivos convencionalmente depende de instalaciones de sala limpia (*cleanroom*) y equipo de fotolitografía, lo cual es costoso y de acceso limitado (Mohd Asri et al., 2021). Esta metodología emplea la litografía suave *cleanroom-free* (Mohd Asri et al., 2021; Mukherjee et al., 2019), utilizando polidimetilsiloxano (PDMS) y moldes fabricados a partir de hojas de Poliestireno Termoplástico (PST) termo conformado (comercialmente conocidas como *Shrinky Dinks*).

Este enfoque accesible permite a cualquier escuela o facultad con infraestructura básica de laboratorio implementar la fabricación de microdispositivos (Castillo Rendón & Ortiz Guadarrama, 2013).

3. Objetivos específicos de aprendizaje centrados en el desarrollo de competencias.

Al finalizar la propuesta didáctica, el estudiantado será capaz de:

Tabla 2. Resultados de aprendizaje esperados.

Categoría	Resultado de Aprendizaje	Referencias
Conceptos Fundamentales	Analizar una necesidad experimental o biomédica sencilla y traducirla en requerimientos de diseño para un microdispositivo de microfluídica. Explicar los fundamentos físicos y tecnológicos involucrados en la operación de sistemas microfluídicos, incluyendo flujo laminar, difusión, número de Reynolds y transporte a microescala.	(Rackus et al., 2019)
Habilidades de Diseño	Diseñar esquemas de microcanales simples utilizando software CAD, justificando la geometría propuesta en función del problema planteado.	(Rackus et al., 2019)

Habilidades Prácticas	Fabricar un molde y una réplica funcional de un microdispositivo empleando litografía suave con poliestireno termoplástico y PDMS. Integrar y utilizar tecnologías digitales para el diseño, documentación, análisis y comunicación de resultados del proyecto. Evaluar experimentalmente el funcionamiento del dispositivo fabricado, identificando limitaciones, defectos de proceso y oportunidades de mejora.	(Rackus et al., 2019; Castillo Rendón & Ortiz Guadarrama, 2013)
Análisis Científico	Comunicar de manera oral, escrita y visual las decisiones de diseño, la metodología empleada, los resultados obtenidos y la justificación técnica de la solución desarrollada. Trabajar colaborativamente en la planeación, ejecución y cierre de un proyecto experimental de ingeniería.	(Morton & Bridle, 2016)

4. Actividades de la propuesta didáctica (Secuencia didáctica - metodología ABPj)

Esta metodología se destaca por reemplazar el equipo costoso de sala limpia por materiales y recursos comunes en un laboratorio o accesibles de adquirir. Para más detalle, ver referencia (Castillo Rendón & Ortiz Guadarrama, 2013). Además, incorpora tecnologías digitales en distintas fases del proyecto con fines de diseño, investigación, documentación, análisis y comunicación.

Iniciar la bitácora experimental verificando la existencia de materiales y recursos conforme a la tabla 3:

Tabla 3. Recursos y especificaciones de materiales.

Recurso	Material/Especificación	Finalidad
Software	Software CAD (cualquiera disponible para comunidad UNAM en: https://www.software.unam.mx/software/autocad).	Diseño de microcanales.
Software	Bases de datos y buscadores académicos para la revisión de antecedentes.	Antecedentes.
Software	Documentos compartidos o bitácoras digitales para el seguimiento del proyecto.	Anotación y reporte.
Software	Hojas de cálculo o software de análisis para el procesamiento de datos experimentales.	Análisis de resultados
Materiales Base	Hojas de Poliestireno Termoplástico (PST, <i>Shrinky Dinks</i>)	Fabricación de los moldes.
Polímero	Kit de elastómero de silicona Sylgard 184 (Dow Corning)	Material para la réplica (chip de microfluídica).
Equipo de Impresión	Impresora láser B&N	Impresión de alta definición sobre el PST.
Equipo de Calentamiento	Horno o Parrilla eléctrica	Termoconformado del molde y polimerización del PDMS.

Equipo de Vacío	Desecador y bomba de vacío (p. ej., Leybold modelo DIVAC 2.2L o similar)	Desgasificación de la mezcla de PDMS y eliminación de burbujas.
Herramientas de Precisión	Balanza (para medir la relación 10:1 por peso de PDMS); Bisturí No. 3 y navaja No. 11]; Sacabocados (0.5 mm de diámetro, p. ej., TED PELLA).	Medición de masa, corte y perforación de entradas/salidas.
Equipo de Sellado	Corona Tester.	Activación superficial de bajo costo para el sellado covalente PDMS-PDMS.
Insumos Varios	Cajas Petri, vasos de precipitado, hisopos de algodón, Isopropanol, cinta adhesiva (SCOTCH), recuadro de vidrio, utensilio plano y rígido.	Limpieza, vaciado, manipulación y almacenamiento.

ETAPAS DE RESOLUCIÓN DEL PROYECTO	
Inicio	
	Presentación del proyecto Se plantea al estudiantado el siguiente reto: diseñar, fabricar y validar un dispositivo microfluídico de bajo costo mediante litografía suave, capaz de resolver una necesidad funcional específica, como mezcla de fluidos, distribución de flujo, generación de gradientes simples o conducción controlada de líquidos a microescala. A partir de este planteamiento, el grupo analiza la relevancia de la microfluídica en contextos biomédicos, experimentales e ingenieriles, e identifica los alcances del proyecto, los productos esperados y los criterios generales de evaluación. El docente introduce el proyecto como un problema auténtico de diseño y fabricación, no como una práctica meramente demostrativa.
	 Etapas de diagnóstico El estudiantado recupera y pone en común sus conocimientos previos sobre microfluídica, flujo laminar, materiales poliméricos, diseño de microcanales y fabricación de dispositivos electrónicos. Asimismo, identifica dudas iniciales y necesidades de aprendizaje para enfrentar el reto planteado. <i>Notas al profesorado:</i>

	i. <i>Promover la discusión en equipos y la elaboración de una primera aproximación al problema, delimitando qué función deberá cumplir su dispositivo y qué criterios técnicos deberán considerarse.</i> ii. <i>Como evidencia, solicitar a cada equipo un planteamiento preliminar del problema y una propuesta inicial de solución.</i>
Desarrollo	
	Etapas de búsqueda de información El estudiantado, organizado en equipos, realiza una búsqueda dirigida de información científica, técnica y metodológica sobre principios de microfluídica, diseños de microcanales, litografía suave, propiedades del polímero PDMS y estrategias de fabricación de bajo costo. Esta etapa también contempla el uso de tecnologías digitales, como buscadores académicos, bases de datos, repositorios institucionales, documentos compartidos y software de diseño asistido por computadora. Con base en la información recopilada, cada equipo delimita con mayor precisión la función de su dispositivo y justifica técnicamente la geometría propuesta. <i>Notas al profesorado:</i> i. <i>Como producto parcial, solicite la elaboración de una síntesis de antecedentes sobre un problema biomédico a resolver con su propuesta de dispositivo microfluídico que incluya un esquema inicial del diseño.</i> ii. <i>Apoyarse de bases de datos académicas, así como de videos de JOVE; Wyss Institute (Organs on Chip), de la revista Lab on a Chip, sección Chips and Tips, etc</i>
	Etapas de producción A partir del análisis previo, cada equipo desarrollará las siguientes actividades para la producción: a. <i>Diseño digital de su dispositivo microfluídico mediante herramientas CAD.</i> b. <i>Fabricación del molde en poliestireno termoplástico siguiendo la metodología descrita en el Anexo A.</i> c. <i>Fabricación de la réplica en PDMS y sellado siguiendo la metodología descrita en el Anexo B, considerando dimensiones, materiales, tiempos de proceso, riesgos y criterios de calidad.</i> d. <i>Inspección y caracterización de los resultados de b. y c. empleando un microscopio óptico y la cámara de sus teléfonos celulares.</i> <i>Notas para el profesorado:</i> i. <i>Durante la fabricación, el estudiantado documenta cada paso en su bitácora experimental, registra incidencias y toma decisiones de ajuste en</i>

	<i>función de los resultados parciales obtenidos. En esta etapa se concreta la construcción del prototipo y se integra la evidencia del trabajo realizado mediante bitácoras digitales, fotografías, esquemas y registros de parámetros de proceso.</i> <i>ii. El énfasis de este proceso se coloca en la toma de decisiones, la resolución de dificultades y la construcción colaborativa de una solución funcional</i> <i>iii. Como evidencia, solicite un reporte parcial de resultados preliminares.</i>
	Etapa de revisión
	Una vez fabricado el prototipo, cada equipo realiza pruebas funcionales para verificar su desempeño. Esto puede incluir la observación del flujo con fluidos coloreados con tinta comestible convencional para la revisión de fugas, la evaluación de continuidad en microcanales y la comparación entre el comportamiento esperado y el observado. <i>Notas para el profesorado:</i> <i>i. A partir de esta revisión, fomente que el estudiantado analice errores de diseño o fabricación, identifique limitaciones del dispositivo y proponga mejoras viables.</i> <i>ii. Favorezca la reflexión técnica sobre la relación entre geometría, materiales, proceso de fabricación y desempeño microfluídico.</i> <i>iii. Como evidencia, solicite un reporte parcial de resultados preliminares y una propuesta argumentada de mejora.</i>
Cierre	
	Etapa de socialización
	Cada equipo presenta su proyecto final al grupo, mostrando el dispositivo fabricado en funcionamiento y explicando el problema que buscó resolver, la lógica del diseño, el proceso de fabricación seguido, los resultados de prueba obtenidos y las mejoras identificadas. <i>Notas para el profesorado:</i> <i>i. La socialización puede realizarse mediante exposición oral, presentación digital, póster técnico o video corto.</i> <i>ii. Esta etapa busca fortalecer la comunicación técnica, la argumentación y la reflexión colectiva sobre distintas formas de resolver un mismo reto mediante recursos accesibles.</i> <i>iii. Se sugiere realizar la evaluación en un evento tipo “feria de proyectos” donde cada equipo decida si presentar una demostración del dispositivo funcionando apoyados de un poster, infografía o presentación</i>

	<i>con diapositivas, o bien, a través de un video demostrativo y con material gráfico para dar la opción virtual. Podría ser un evento abierto al público y que cada equipo reciba una evaluación externa de las personas asistentes.</i> <i>iv. Durante el evento de socialización, implementar una dinámica de coevaluación en la que cada equipo deberá utilizar una lista de cotejo simplificada para valorar el desempeño de sus pares. El énfasis no debe estar en la "calificación", sino en la identificación de soluciones creativas a problemas comunes de fabricación (como el sellado o la definición de canales) que otros equipos hayan resuelto de manera distinta.</i>
	Etapas de evaluación
	La evaluación se desarrolla de manera continua y formativa a lo largo de todas las etapas del proyecto. Se consideran tanto el proceso como el producto final, valorando la participación activa, el trabajo colaborativo, la calidad del diseño, la documentación del proceso, el uso pertinente de tecnologías digitales, el funcionamiento del prototipo y la capacidad de análisis crítico sobre los resultados obtenidos. <i>Nota al profesorado:</i> <i>i. Se recomienda combinar heteroevaluación, coevaluación y autoevaluación, con apoyo de rúbricas claramente definidas desde el inicio del proyecto.</i> <i>ii. Como evidencias integradoras del proyecto se consideran: el planteamiento del problema, la búsqueda y análisis de información, el diseño digital del dispositivo, la bitácora de fabricación, el prototipo construido, el reporte de pruebas funcionales y la presentación final</i> <i>iii. Evaluar no sólo si el dispositivo funcionó correctamente, sino también la pertinencia de la solución propuesta, la justificación técnica de las decisiones tomadas, la capacidad de mejora y la claridad en la comunicación de resultados.</i>

5. Criterios técnicos de evaluación

La evaluación debe ser continua y reflejar el enfoque ABPj e interdisciplinario de la propuesta didáctica. En la tabla 4 se presenta una propuesta de ponderación y criterios técnicos para que cada docente elabore su propia rúbrica:

Tabla 4. Ponderación sugerida para la evaluación.

Evidencia	Sugerencia de Ponderación	Criterios
Planteamiento del problema y propuesta de diseño	20%	Claridad del reto, pertinencia del diseño, justificación técnica, uso de fundamentos de microfluídica
Bitácora de proyecto y documentación digital	20%	Registro sistemático, uso adecuado de tecnologías digitales, reflexión sobre decisiones y ajustes
Prototipo fabricado y calidad funcional	25%	Correspondencia con el diseño, calidad de fabricación, sellado, funcionamiento básico
Reporte técnico de resultados	20%	Análisis de resultados, interpretación, identificación de errores y propuestas de mejora
Presentación final y defensa del proyecto	15%	Claridad expositiva, argumentación, trabajo colaborativo y comunicación técnica

6. Referencias

- Castillo Rendón, Y. O., & Ortiz Guadarrama, M. (2013). *Plataforma BioMEMS para cultivo y estimulación celular*. Unam.mx. <https://ru.dgb.unam.mx/items/cc84fe70-0aa4-4a32-9c1a-151fe19b214d>
- Eddings, M. A., Johnson, M. A., & Gale, B. K. (2008). Determining the optimal PDMS–PDMS bonding technique for microfluidic devices. *Journal of Micromechanics and Microengineering: Structures, Devices, and Systems*, 18(6), 067001. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/18/6/067001>
- Grimes, A., Breslauer, D. N., Long, M., Pegan, J., Lee, L. P., & Khine, M. (2008). Shrinky-Dink microfluidics: rapid generation of deep and rounded patterns. *Lab on a Chip*, 8(1), 170–172. <https://doi.org/10.1039/b711622e>
- Haubert, K., Drier, T., & Beebe, D. (2006). PDMS bonding by means of a portable, low-cost corona system. *Lab on a Chip*, 6(12), 1548–1549. <https://doi.org/10.1039/b610567j>
- Madou, M. J. (2018). *Fundamentals of microfabrication and nanotechnology, three-volume set*. CRC Press.
- Maluf, N., & Williams, K. (2004). *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering* (2nd ed.). Artech House.
- Mohd Asri, M. A., Nordin, A. N., & Ramli, N. (2021). Low-cost and cleanroom-free prototyping of microfluidic and electrochemical biosensors: Techniques in fabrication and bioconjugation. *Biomicrofluidics*, 15(6), 061502. <https://doi.org/10.1063/5.0071176>
- Morton, J. A. S., & Bridle, H. (2016). Student-led microfluidics lab practicals: Improving engagement and learning outcomes. *Biomicrofluidics*, 10(3), 034117. <https://doi.org/10.1063/1.4953448>
- Mukherjee, P., Nebuloni, F., Gao, H., Zhou, J., & Papautsky, I. (2019). Rapid prototyping of soft lithography masters for microfluidic devices using dry film photoresist in a non-cleanroom setting. *Micromachines*, 10(3), 192. <https://doi.org/10.3390/mi10030192>

Oropeza-Ramos, L., Macias, A., Juarez, S., Falcon, A., Torres, A., Hautefeuille, M., & Gonzalez, H. (2011). Low cost micro-platform for culturing and stimulation of cardiomyocyte tissue. *2011 IEEE 24th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*.

Rackus, D. G., Riedel-Kruse, I. H., & Pamme, N. (2019). “Learning on a chip:” Microfluidics for formal and informal science education. *Biomicrofluidics*, 13(4), 041501. <https://doi.org/10.1063/1.5096030>

Tan, A., Rodgers, K., Murrihy, J., O’Mathuna, C., & Glennon, J. D. (2001). Rapid fabrication of microfluidic devices in poly(dimethylsiloxane) by photocopying. *Lab on a Chip*, 1(1), 7–9. <https://doi.org/10.1039/b102905n>

Tuomikoski, S. (2007). *Fabrication of SU-8 microstructures for analytical microfluidic applications*. Helsinki University of Technology.

Zhao, X.-M., Xia, Y., & Whitesides, G. M. (1997). Soft lithographic methods for nano-fabrication. *Journal of Materials Chemistry*, 7(7), 1069–1074. <https://doi.org/10.1039/A700145B>

7. Anexo A. Fabricación de moldes de poliestireno termoplástico *Shrinky Dinks*

Diseño CAD: Se diseñan los canales del micro-dispositivo con el auxilio de un software CAD con base en el problema de aprendizaje seleccionado por el estudiantado.

Impresión: La tecnología de la impresora impactará en la cantidad de impresiones que se realicen sobre las láminas de PST, así como a la definición de estas (capas o depósitos traslapados). Utilizado una impresora HP Laser Jet Pro 400 color M451dn, se puede sobreimprimir siete veces el diseño sobre la misma hoja de PST sin que existan errores significativos de impresión figura A1a, por lo que hay que cuidar en la medida de lo posible, la alineación en cada impresión. Al imprimir siete veces se logra una profundidad aproximada de la tinta de $6.6\mu\text{m}$ y después de aplicar calor aumenta termoplásticamente a $60\mu\text{m}$ aproximadamente, un aumento de más del 500% como se explicó anteriormente en la figura 4.

Limpieza y Reducción: Como ya se mencionó en la sección 1, para la fabricación de los moldes se utilizaron hojas de poliestireno termoplástico (PST), comercialmente llamadas *Shrinky Dinks*, las cuales se reducen dimensionalmente por medio de calor a 160°C , encogiéndose aproximadamente a un tercio de su tamaño original y aumentando hasta nueve veces en espesor. Se recorta el diseño de la hoja impresa de PST cuidando una simetría rectangular alrededor del diseño. Como en la impresión quedan residuos no deseados (figura A2), se retiran cuidadosamente con un hisopo de algodón previamente remojado en isopropanol. Colocamos la sección impresa sobre una base de vidrio, previamente sanitizada, se introduce en un horno a una temperatura de 160°C durante 2 minutos 40 segundos aproximadamente. Al retirar el molde del horno y antes de que se enfríe la superficie del molde, nos auxiliamos de un utensilio rígido y plano, el cual es presionado suavemente sobre el molde para lograr uniformidad quedando como en la figura A2(3).

Diseño impreso en láminas de PTS

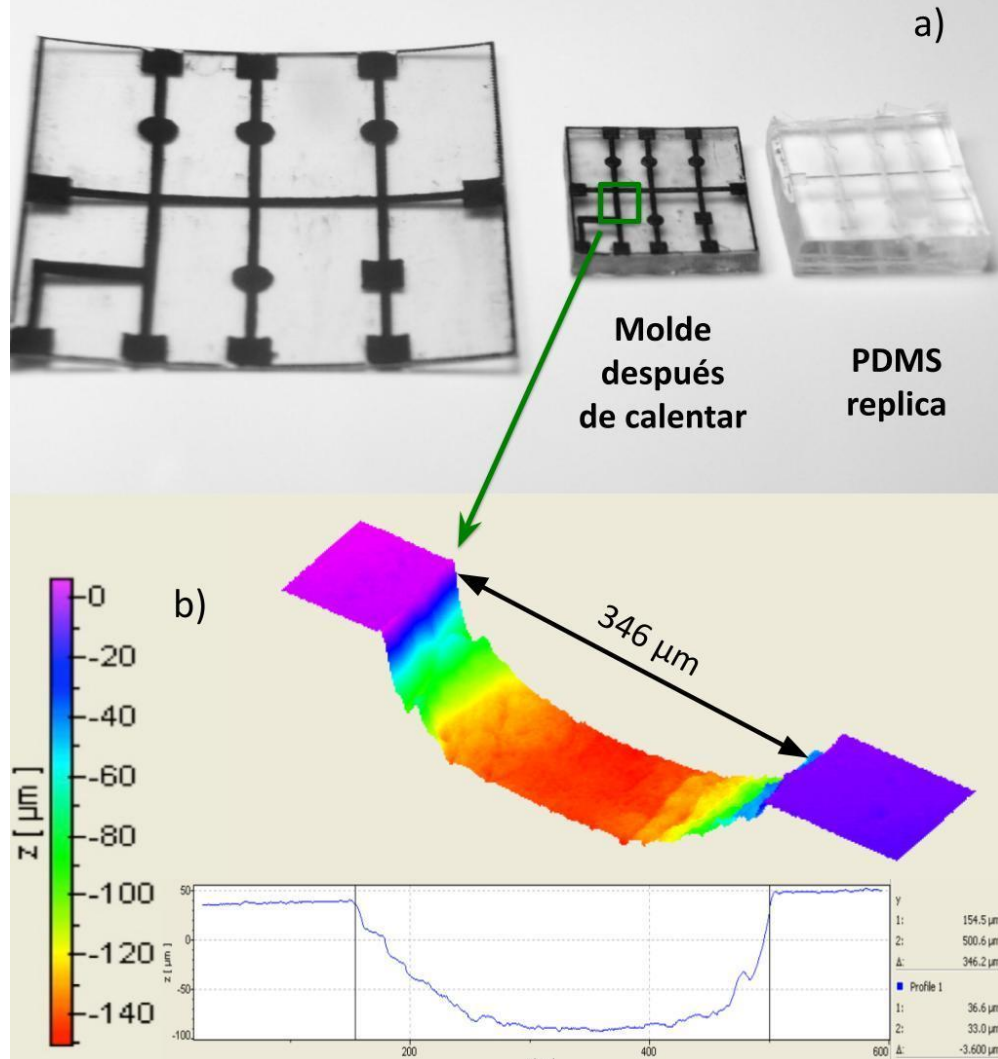


Figura A1 (a) Fotografía del proceso de fabricación que muestra: el diseño impreso en la hoja de PST (Poliestireno Termoplástico), el molde obtenido después de calentar el PST y su réplica en PDMS; y en (b) se presentan los resultados del perfilómetro óptico de la sección transversal de los canales, tomados con el sistema de topografía óptica MSA-400 de Polytec. Si no se tiene este equipo, una vez realizada la réplica de PDMS siguiendo el Anexo B, se puede hacer un corte en la sección transversal de los microcanales y medir el escalón en el microscopio, con ayuda de una rejilla calibrada. Adaptado de (Oropeza-Ramos et al., 2011).

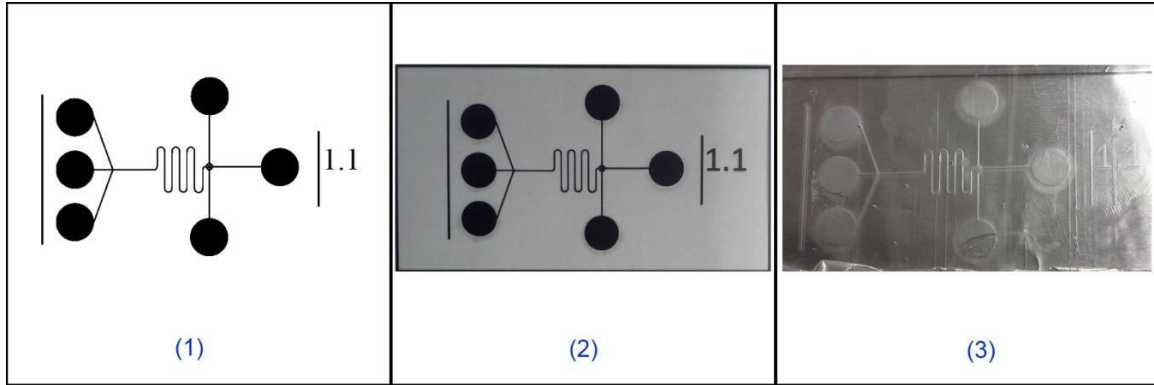


Figura A2. Algunos de los elementos de un proceso por litografía suave. (1) Imagen generada por computadora para el diseño del molde. (2) Molde fabricado en un polímero termoplástico. (3) Réplica en PDMS del molde. Las dimensiones del molde y de la réplica son 5.5 [mm] de largo por 3 [mm] de alto. Adaptado de (Oropeza-Ramos et al., 2011).

8. Anexo B. Fabricación del dispositivo microfluídico por litografía suave

Materiales y Equipo

- Indumentaria de seguridad: guantes y bata (uso obligatorio).
- Cristalería: vaso de precipitado (el volumen debe ser 4 a 5 veces mayor a la cantidad de PDMS a preparar), agitador.
- Polímero: PDMS SYLGARD 184 Silicone Elastomer.
- Equipo de vacío: bomba de vacío y campana desecadora.
- Limpieza y consumibles: alcohol isopropílico, toallitas Kimtech, papel aluminio y cinta mágica.

Procedimiento Experimental

1. Preparación Inicial

- Horno: precalentar a 60°C.
- Área de trabajo: limpiar con alcohol isopropílico y cubrir con papel aluminio.
- Cálculos: determinar la cantidad necesaria de PDMS para llenar el molde y la proporción de mezcla.

Volumen del molde: $V = l \times a \times h$ [mm³]

Masa del molde: m [kg] = ρ_{PDMS} [kg/m³] $\times V$ [m³]

Proporción de mezcla prepolímero y agente curante (10:1)

Se debe mezclar el prepolímero con el agente curante en una relación 10:1

Masa total: $m_{molde} = m_{PDMS} + m_{AgenteCurante}$

$$m_{AgenteCurante} = m_{molde} \div 11$$

2. Preparación del PDMS y mezclado

- Nivelar la balanza, colocar el vaso de precipitado y tarar.

- Agregar el prepolímero de forma lenta y controlada, evitando que toque las paredes o caiga fuera.
- Agregar el agente curante de forma análoga.
- Mezclar los dos componentes moviendo el agitador de forma vertical o en zigzag, raspando las paredes a alta velocidad por aproximadamente 2 minutos (evitando la formación de burbujas).

3. Proceso de desecado (desgasificación)

- Colocar el vaso sobre una cama de papel aluminio dentro de la campana desecadora.
- Conectar la manguera de la bomba de vacío a la campana.
- Asegurar que la llave de paso esté en posición abierta (paralela a la manguera).
- Encender la bomba y anotar la presión de vacío que alcanza, debe quedarse encendida el tiempo necesario hasta que desaparezcan las burbujas.
- **Para retirar el vacío:** Apagar la bomba, cerrar el flujo de la campana a la bomba colocando la llave de paso en posición perpendicular a la manguera, retirar la manguera y abrir la válvula lentamente para dejar entrar el aire poco a poco.

4. Vertido en el molde

- Limpiar el molde con aire comprimido filtrado (sopletear).
- Verter la mezcla desde una esquina de forma lenta y paciente para evitar la generación de burbujas, hasta que se llene el molde.
- Segundo desecado: colocar el molde en la campana y aplicar vacío nuevamente hasta eliminar todas las burbujas.

5. Curado y desmolde

- Para la polimerización se coloca el molde en el horno a 60°C por un tiempo mínimo de 1 hora (recomendado 1.5 horas).
- Limpiar el bisturí y la espátula que se utilizarán con alcohol isopropílico.
- Realizar incisiones con el bisturí en el borde del molde maestro de forma recta y superficial, acercándose poco a poco al fondo para liberar el PDMS sin dañar el sustrato.

- Una vez que se ha desprendido de las esquinas del molde se coloca la espátula en una esquina y se usa como palanca para permitir la entrada de aire y desprender la réplica de PDMS.
- Quitar rebabas y limpiar el molde con aire filtrado antes y después del proceso.



Figura B1. Proceso de litografía suave en etapas (fuente: elaboración propia).

6. Extracción de la réplica

Utilizando un bisturí del No. 3 y con una navaja No. 11 de acero inoxidable desechable, cortar la réplica obtenida en el PDMS; siguiendo el contorno del molde (figura B2a). Con la ayuda de una espátula se retira lentamente para evitar rupturas en la réplica (figura B2b).

Para eliminar partículas de PDMS, se limpia la réplica extraída con cinta mágica adhesiva (marca Scotch) de tal forma que se retiran partículas y pelusas. Posteriormente, para evitar futuras contaminaciones de micropartículas, las réplicas se envuelven en la cinta.

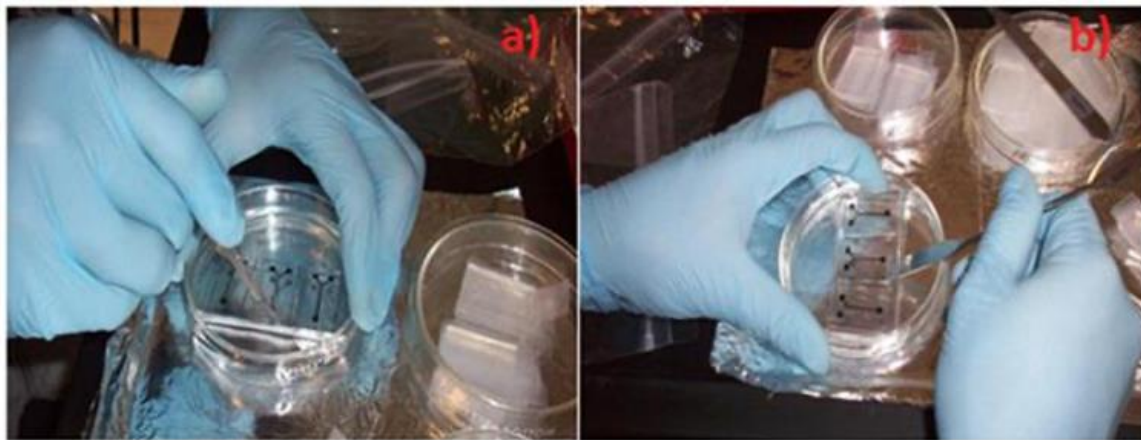


Figura B2. (a) Proceso de corte de la réplica. (b) Proceso de extracción de la réplica y chips cubiertos con cinta scotch (Castillo Rendón & Ortiz Guadarrama, 2013)

Para realizar las entradas y salida del sistema de perfusión e inyección de células, perforamos la tapa con la ayuda de un sacabocados (marca TED PELLA de 0.5mm de diámetro), cuidando la alineación con el diseño de la base (ver figura B3a).

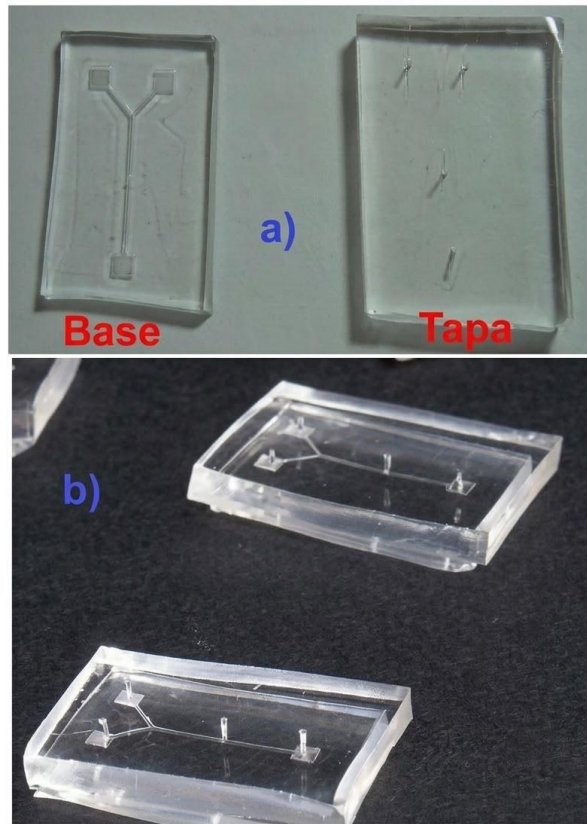


Figura B3 (a) El molde con la base y la tapa antes de sellarlos. (b) Muestras del chip sellado después de aplicarles el tratamiento corona (Castillo Rendón & Ortiz Guadarrama, 2013).

7. Sellado del dispositivo

El sellado que realizamos es de una capa micro estructurada de PDMS (réplica) con el diseño de cada equipo con un portaobjetos de vidrio u otra capa lisa de PDMS. Para realizarlo, es necesario modificar la superficie de ambas caras de la unión, proceso al que se le conoce como activación de superficies, que generalmente se emplea para esterilizar, convertir una zona hidrofóbica a una hidrofílica y para facilitar la unión entre diversas superficies.

Para activar la superficie del PDMS existen diversos métodos, tratamiento por cámaras de plasma de oxígeno, exposición a rayos UV y utilizando el corona tester o bobina de Tesla. La ventaja del uso de un corona tester es su bajo costo, portabilidad y fácil manejo sin aditamento alguno.

Es así que para adherir la cubierta con la base del dispositivo es necesario ionizar las superficies; con el corona tester (que produce el efecto corona) se genera una diferencia de potencial la cual produce la ionización de la superficie próxima. En este proceso se alinean los iones OH en la superficie del PDMS (oxidación de la superficie) y como otro efecto se libera ozono. Al poner en contacto las superficies activadas de la cubierta con la base se generan enlaces covalentes, los cuales aseguran el sellado entre las dos superficies, como se ejemplifica en la figura B4a.

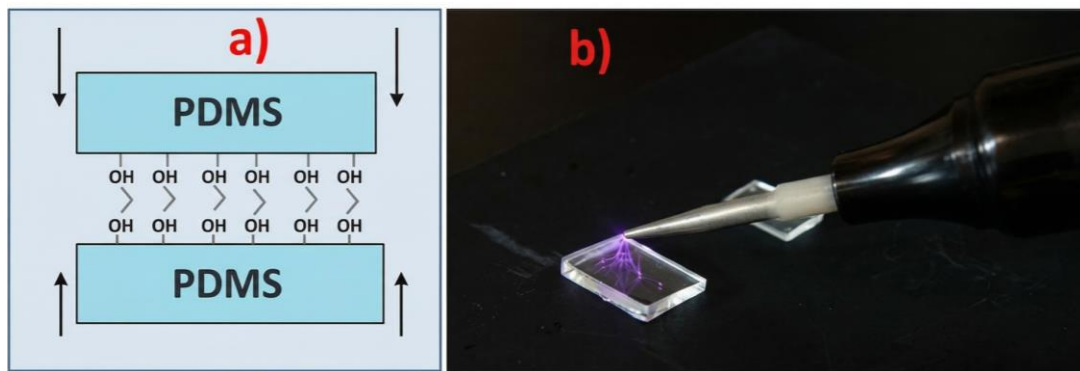


Figura B4 (a) Ejemplificación del efecto corona sobre PDMS. Se ionizan en proporciones distintas la cubierta y la base. (b) Aplicación de corona sobre la tapa y la base del chip, adaptado de (Castillo Rendón & Ortiz Guadarrama, 2013).

Sobre una hoja limpia se colocan la base y la cubierta. Utilizando el Corona tester se oxida la *base por 40 segundos* y la *tapa por 80 segundos* (ver figura B4b). Inmediatamente después de la ionización, se ponen en contacto las superficies de la cubierta con la de la base, y ejerciendo una presión uniforme. Posteriormente colocamos el chip dentro de una cámara térmica, confeccionada con una hielera de unicel, dentro de la cual se colocó un resistor de pecera (que calienta el ambiente a 33°C) durante 24 horas, superponiendo un objeto rígido sobre el chip para asegurar el contacto uniforme entre ambas superficies y así obtener un buen sellado (Haubert et al., 2006; Eddings et al., 2008).