

Hot Science



Polímeros inteligentes: Las cadenas que saben cortar por lo sano

Smart polymers: Chains that know when to make the clean cut

Resumen

Los polímeros inteligentes son materiales capaces de responder a estímulos como la temperatura o el pH, modificando su estructura para liberar medicamentos de forma controlada. Funcionan como “guardianes moleculares” que solo actúan en el momento y lugar precisos, mejorando la eficacia y reduciendo los efectos secundarios. En el IPN se han aplicado estos principios para crear un apósito inteligente que trata heridas crónicas al liberar compuestos antimicrobianos y cicatrizantes al detectar una infección. Su bajo costo facilita la producción a gran escala y su acceso en comunidades vulnerables. Este enfoque promete aplicaciones futuras en oncología, medicina regenerativa e infecciones.

Palabras clave: Polímeros inteligentes, liberación controlada de fármacos, respuesta a estímulos.

Summary

Smart polymers are materials that respond to stimuli, such as temperature or pH, and alter their structure to release drugs in a controlled manner. They function as “molecular guardians” that act only at the precise moment and location, enhancing effectiveness and reducing side effects. At the National Polytechnic Institute (IPN), these principles have been applied to develop an intelligent dressing for chronic wounds, which releases antimicrobial and healing compounds upon detecting an infection. Its low cost facilitates large-scale production and access in vulnerable communities. This approach holds promise for future applications in oncology, regenerative medicine, and infection control.

Keywords: Smart polymers, controlled drug release, stimulus-responsive.

Esperanza Peralta-Cuevas¹

Nahomi Y. Degollado-Hernández^{1,2}

Francisca Villanueva-Flores¹

¹Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Instituto Politécnico Nacional, Boulevard de la Tecnología, 1036 Z-1, P 2/2, 62790 Atlacholaya, Morelos, México.

²Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del Estado de Morelos, Av. Universidad Tecnológica 1, Palo Escrito, 62765, Emiliano Zapata, Morelos, México.

Autor para la correspondencia:
fvillanuevaf@ipn.mx

Introducción

Vivimos rodeados de tecnología “inteligente”. En ciencia de materiales, eso significa crear polímeros que sienten su entorno y responden. Nuestra piel ya lo hace: cuando algo roza o irrita, cambia y se repara. El nexo es claro: si la naturaleza ajusta sus tejidos según las señales, también podemos diseñar materiales que reaccionen para ayudar al cuerpo a sanar mejor y con menos dolor.

En medicina, esto se traduce en terapias autorreguladas: polímeros que, al detectar cambios de pH o de temperatura, ajustan su forma o sus poros para liberar el fármaco justo donde hace falta y en la cantidad necesaria. “Liberación controlada” significa que el medicamento no sale de golpe, sino a un ritmo y dosis previsible, por ejemplo, más rápido en un tejido inflamado y más lento en los sanos,

lo que reduce dolor, riesgos y efectos secundarios. En términos simples, un polímero es una cadena de monómeros repetidos; los “inteligentes” añaden la capacidad de cambiar de estado de manera reversible en función de la señal que reciban y, con ello, dosificar su contenido de forma predecible (Figura 1) [1].

Y más allá de la salud, ya asoman aplicaciones cotidianas: en cosmética, cremas que liberan activos según el pH de la piel o protectores que refuerzan su filtro con la luz UV; en textiles, fibras que ventilan al sudar, aíslan con frío o se autorreparan tras un rasguño; en hogar e industria, pinturas que sellan microgrietas, envases que cambian de color si un alimento se estropea y adhesivos que se sueltan con calor o luz [2]. Misma lógica en todos los casos: materiales que escuchan al entorno y responden para hacernos la vida más segura, cómoda y eficiente.

Interruptores moleculares en acción

Para entenderlo, imagina una esponja inteligente. Si el ambiente se calienta o se vuelve más ácido, “se exprime” y libera el fármaco; cuando el entorno mejora, “se relaja” y deja de liberarlo. Detrás hay enlaces químicos que se unen y se separan en función del estímulo. Con esta base, pasemos a los usos reales.

Algunos polímeros responden a la temperatura: presentan una LCST (temperatura crítica de transición). Por encima de esa LCST, se contraen y expulsan agua (y parte del fármaco); por debajo, se hidratan y lo retienen. Un ejemplo clásico es el poli(N-isopropilacrilamida) (PNIPAM), que se colapsa alrededor de 32 °C [3]. Esta lógica ya se aplica en la práctica: lentes de contacto que dosifican fármacos para el glaucoma, apósitos como AQUACEL® Ag, que liberan plata cuando la herida está húmeda, y

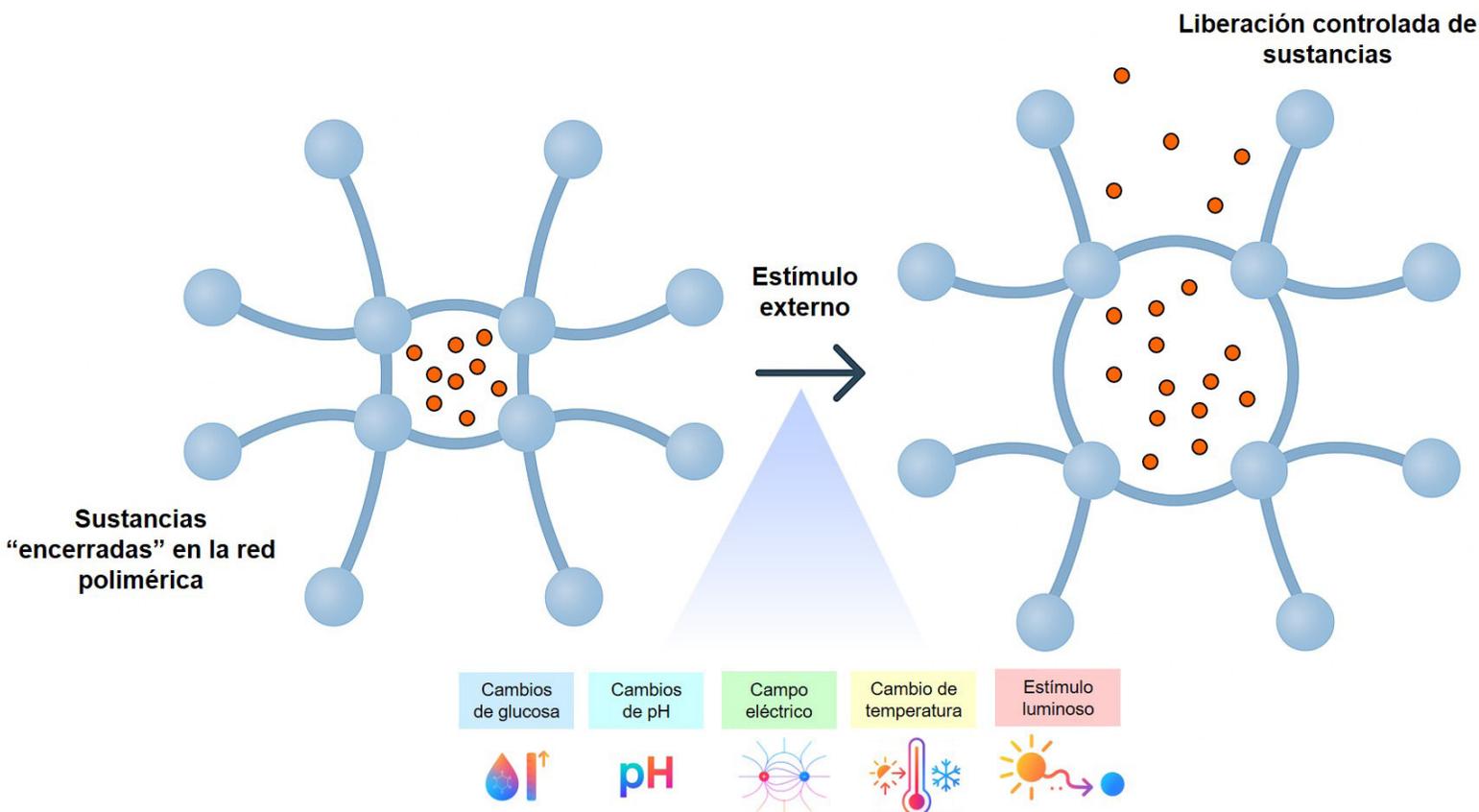


Figura 1. Funcionamiento de un polímero inteligente. La malla molecular atrapa pequeñas moléculas y, ante un estímulo (p. ej., cambio de pH, temperatura o humedad), se contrae o se expande y libera el fármaco de forma dosificada, entregándolo cuando y donde se necesita.

sistemas sensibles a la glucosa, hoy en evaluación clínica [4]. En suma, son materiales que “escuchan” el entorno y actúan únicamente cuando hace falta.

Hidrogel que ‘escuchan’ la herida: liberación inteligente

¿Qué aportamos nosotros y por qué importa? En el Instituto Politécnico Nacional (CI-CATA Unidad Morelos) desarrollamos un apósito de una mezcla de biopolímeros naturales y accesibles que responde a pH ácido, a la humedad y a enzimas asociadas a la infección. El prototipo se aplica como un parche hidrogel flexible y recortable: se coloca sobre la herida limpia y se fija con una venda o con un film semipermeable; en superficies amplias puede colocarse en módulos contiguos. Si la herida se inflama y el pH disminuye, la matriz se abre y libera más fármaco (nanocurcumina y péptidos antimicrobianos); cuando la herida mejora, la liberación disminuye. Así conectamos la ciencia del material con una solución concreta, fabricada en agua y a baja temperatura, pensada para sistemas de salud con recursos limitados y validada a nivel de prototipo (Figura 2) [5].

Además del formato de parche, el mismo material puede prepararse como lámina fina o compresa absorbente para heridas superficiales e irregulares, manteniendo el mecanismo de liberación sensible al entorno. Su producción de bajo costo facilita la fabricación a gran escala y su disponibilidad en contextos con acceso limitado a tratamientos avanzados.

Este enfoque representa una ventaja frente a los tratamientos convencionales en heridas crónicas (como pie diabético, úlceras por presión y lesiones postquirúrgicas complejas). El control inteligente de la liberación puede acelerar la cicatrización, reducir complicaciones y disminuir las visitas a los centros de salud, con beneficios clínicos y económicos para pacientes y sistemas de salud.

La visión de futuro va más allá: no se trata solo de crear materiales que respondan a estímulos, sino de integrarlos con sensores y algo-

ritmos de IA que optimicen la respuesta según las condiciones de cada paciente, ajustando dosis y tiempos de liberación de forma personalizada.

En oncología, por ejemplo, podrían diseñarse para reconocer marcadores específicos de células tumorales y liberar fármacos directamente en el microambiente tumoral, minimizando los daños a los tejidos sanos. En medicina regenerativa, liberar factores de crecimiento justo cuando el tejido lo necesite. Y en el manejo de infecciones, actuar como centinelas químicas, liberando defensas únicamente cuando detecten señales de amenaza.

Lo fascinante es que, pese a su complejidad, la base conceptual es sencilla: cadenas moleculares que actúan como interruptores adaptativos, se encienden o se apagan según el entorno, guiadas por señales químicas o físicas, como cambios de pH, temperatura, luz o concentración de sales. En la escala nanoscópica, miles de veces menor que el grosor de un cabello, esas cadenas realizan giros conformacionales; sufren protonación (ganan o pierden protones), lo que modifica su comportamiento; y experimentan cambios de hidratación al atraer o liberar moléculas de agua, como una esponja. A escala humana, esto se traduce en menos dolor, menos riesgos y tratamientos más eficaces. En un futuro cercano, estos guardianes invisibles podrían trabajar dentro de nosotros de forma continua, ajustando la terapia en el lugar y en el momento precisos.

Limitaciones y desafíos

Siendo claros, el cuerpo no es uniforme. El pH, la humedad y las defensas varían de una zona a otra, y cualquier material debe funcionar de forma segura y predecible en esas condiciones reales. Además, debe producirse siempre de la misma manera y a un costo razonable. Por eso avanzamos paso a paso: probamos, medimos, ajustamos las fórmulas para que no irriten, y realizamos estudios controlados antes de usarlas en personas. En pocas palabras: el potencial es grande, pero seguiremos con evi-

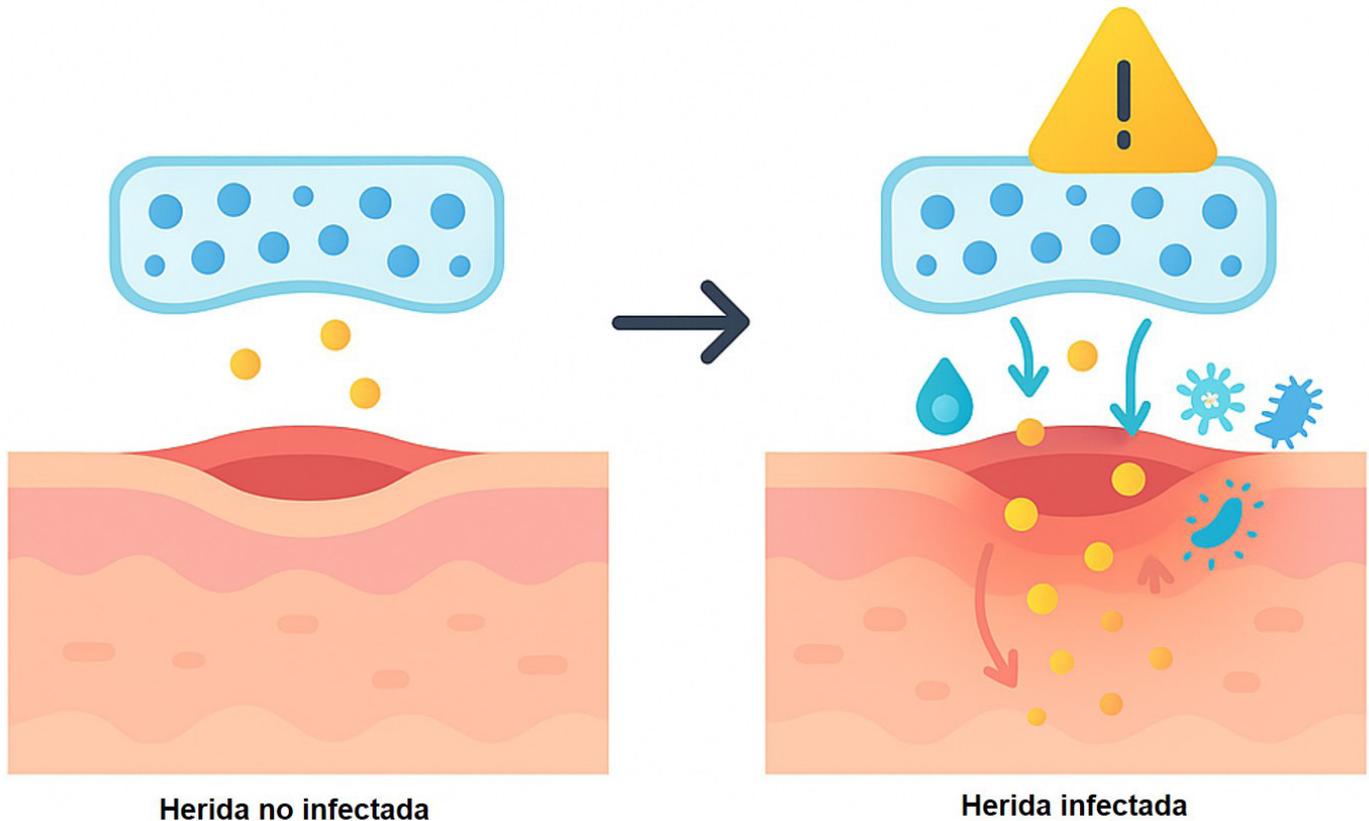


Figura 2. Parche inteligente para heridas. Se aplica como lámina de hidrogel recortable, colocada sobre la herida limpia y fijada con venda o película semipermeable. En condiciones estables, la liberación es lenta; ante señales de infección (más humedad, mayor acidez), el polímero libera más fármaco de forma focalizada, lo que ayuda a controlar los gérmenes y a acelerar la cicatrización.

dencia y prudencia para que estas soluciones lleguen a la práctica clínica de forma segura [6].

También es fundamental que estos sistemas sean biocompatibles y biodegradables, que se descompongan en sustancias seguras y que no se acumulen. Fabricarlos, además, exige un control milimétrico: cada lote debe salir idéntico, estable durante el almacenamiento y el transporte, y con un rendimiento predecible, lo que hoy implica procesos complejos y costosos. Finalmente, su uso médico requiere ensayos rigurosos y evaluaciones prolongadas para demostrar su seguridad y beneficios reales. En síntesis, el potencial es enorme, pero todavía hay camino por recorrer para que estos “guardianes moleculares” salten del laboratorio a la práctica cotidiana.

Conclusiones

Los polímeros inteligentes son materiales que detectan cambios en la herida (como una

mayor humedad o acidez) y liberan solo la cantidad necesaria de tratamiento, justo cuando se requiere. Ya existen ejemplos de apósitos para heridas crónicas y, combinados con sensores e inteligencia artificial, podrán avisar antes de que aparezcan complicaciones y ajustar la terapia en tiempo real.

Próximo paso: seguir comprobando que son seguros, efectivos y accesibles, explicar sus beneficios con un lenguaje sencillo y trabajar con el personal de salud y las autoridades para que estas soluciones lleguen a quienes más las necesitan. El objetivo final es claro: menos dolor, menos infecciones y una cicatrización más rápida y digna para las personas. **iBIO**

Agradecimientos

Se agradece el financiamiento otorgado por los proyectos SIP20242814, SIP20250306, SIP20251096 y SIP20254781 del Instituto Politécnico Nacional, así como el proyecto de CBF-2025-I-1532 de la Convocatoria de Ciencia Básica y de Frontera 2025 de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI). para la realización de este trabajo. Se declara que se utilizó la herramienta ChatGPT-4 únicamente como apoyo para la revisión ortográfica y la mejora de la claridad del estilo de redacción en algunas secciones del texto, sin comprometer la originalidad ni el rigor científico del manuscrito.

Referencias

- [1] Villanueva-Flores, F., Miranda-Hernández, M., Flores-Flores, J. O., Porras-Sanjuanico, A., Hu, H., Pérez-Martínez, L., Ramírez, O. T., & Palomares, L. A. (2019). Poly(vinyl alcohol co-vinyl acetate) as a novel scaffold for mammalian cell culture and controlled drug release. *Journal of Materials Science*, 54(10), 7867–7882. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03402-1>
- [2] Villanueva-Flores, F., & Palomares, L. A. (2022). Low-cost poly(vinyl formal) for heavy metal removal from water of a polluted river. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 12(1), 52–65. <https://doi.org/10.2166/wrd.2022.077>
- [3] Heskins, M., & Guillet, J. E. (1968). Solution Properties of Poly(N-isopropylacrylamide). *Journal of Macromolecular Science: Part A - Chemistry*, 2(8), 1441–1455. <https://doi.org/10.1080/10601326808051910>
- [4] Convatec. (2024). *Aquacel*™. <https://www.convatec.com/es-co/productos/cuidado-avanzado-de-heridas/marcas-comerciales/pc-wound-aquacel/>
- [5] Villalobos, C. (31 de mayo de 2024). Parche inteligente para tratar heridas crónicas. *Gaceta Politécnica*, Instituto Politécnico Nacional (IPN), 174, 13–15.
- [6] Balcerak-Woźniak, A., Dzwonkowska-Zarzycka, M., & Kabatc-Borcza, J. (2024). A Comprehensive Review of Stimuli-Responsive Smart Polymer Materials—Recent Advances and Future Perspectives. *Materials*, 17(17), 4255. <https://doi.org/10.3390/ma17174255>