

La ciencia detrás de los sustitutos óseos inteligentes

por Juan José Martínez Sanmiguel y Barbara Moreno Murguía

Cuando el hueso no puede repararse solo

¿Qué pasa cuando un hueso no puede sanar por sí solo? En este texto exploraremos cómo la ciencia está creando materiales que no solo rellenan la lesión, sino que, además. interactúan con los tejidos circundantes para guiar la regeneración ósea.



Imagen: Unsplash

Los huesos de nuestro cuerpo tienen una capacidad asombrosa de repararse por sí solos. Pero hay situaciones como fracturas complejas, defectos óseos importantes o enfermedades como la osteoporosis en las que el cuerpo simplemente no puede sanar por sí mismo. También sucede con el envejecimiento, donde la regeneración natural disminuye (Luczak, 2023).

Cuando esto sucede, los médicos recurren a soluciones especializadas como los injertos óseos, que pueden provenir del propio paciente (autoinjerto), de un donante humano (alogénico) o incluso de animales (xenogénico). Aunque efectivos, su disponibilidad puede ser baja, además estos procedimientos conllevan riesgos importantes (Santoro, 2025; Jiang, 2021). Por ejemplo, en algunos injertos alogénicos presentan una tasa de fracaso significativamente mayor que los autoinjertos (casi cuatro veces más) (Hofmann et al., 2025). Los injertos osteocondrales alogénicos, que incluyen hueso y cartílago, también muestran un riesgo de fallo de hasta el 25 % en seguimientos a largo plazo (Hofmann et al., 2025). En el caso de los autoinjertos, al provenir del propio paciente, enfrentan menos complicaciones inmunológicas y un menor riesgo de fallo clínico, sin embargo, requieren una cirugía adicional para extraer el tejido.

Es aquí donde la ciencia entra en acción con una propuesta moderna y prometedora: los sustitutos óseos sintéticos inteligentes. Se trata de materiales diseñados en laboratorio para estimular la formación de hueso nuevo mediante la liberación controlada de iones bioactivos y finalmente reabsorberse sin dejar residuos.

Sustitutos óseos inteligentes: ¿cómo funciona esta nueva tecnología médica?

Después de conocer las limitaciones de los injertos, surge una alternativa fascinante: los sustitutos óseos inteligentes. Para entenderlo mejor, imagina el caso de un paciente con una fractura complicada. Durante la cirugía, el médico coloca pequeñas partículas porosas en el área afectada, donde falta hueso. Estos biomateriales pueden presentarse en

forma de gránulos, polvos o pastas moldeables, adaptándose al tamaño y forma del defecto óseo. En la Figura 1 se muestra, primero la fotografía de un vial con gránulos cerámicos y, posteriormente, las micrografías electrónicas de barrido que evidencian la morfología de los gránulos de un relleno óseo, cuya porosidad favorece la adhesión celular, el paso de nutrientes y la formación de vasos sanguíneos.

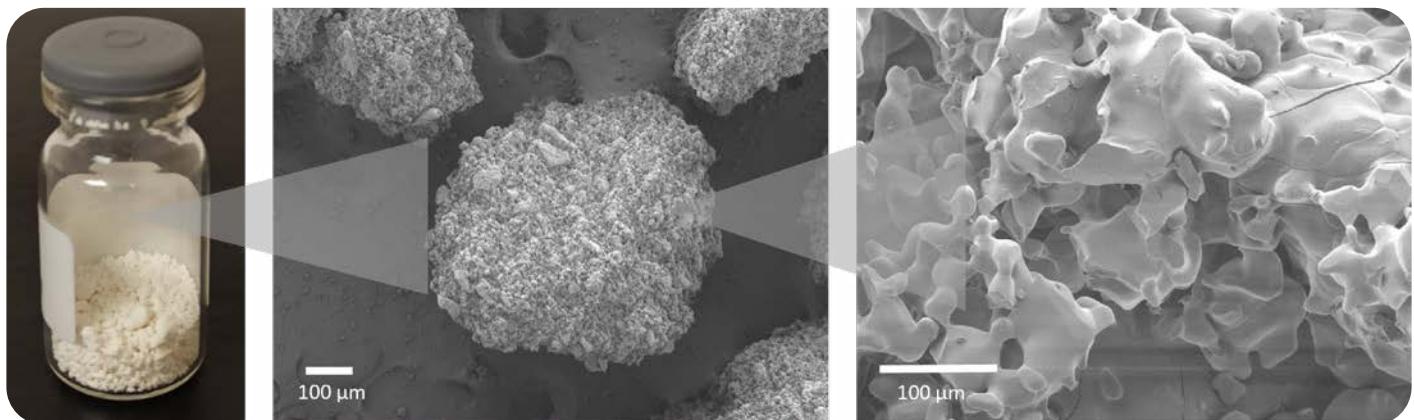


Figura 1. De izquierda a derecha, fotografía de gránulos cerámicos en vial y micrografías electrónicas de barrido que muestran la morfología de los gránulos de un relleno óseo. Imágenes obtenidas por Adair Jiménez Nieto. Reproducida con permiso del autor.

Más allá de ser un “relleno”, este material estimula respuestas biológicas al entrar en contacto con fluidos fisiológicos, activando la capacidad natural de regeneración. Funcionan como un andamio microscópico: una estructura diseñada para integrarse al cuerpo y guiar el crecimiento del nuevo hueso. A medida que el hueso se regenera, el material se va integrando y degradando gradualmente, hasta que solo queda tejido óseo propio y funcional, ver Figura 2.

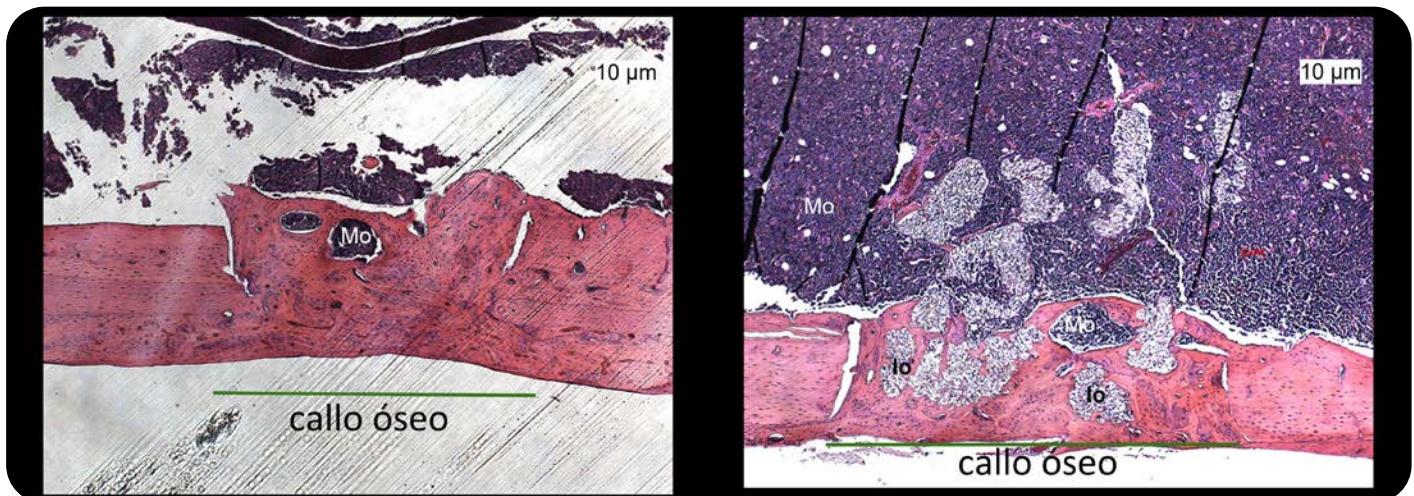


Figura 2. Cortes histológicos representativos de defectos óseos implantados con silicofosfatos de calcio con distinta relación Ca/Si. En el material con mayor contenido de calcio (A) se observa una integración más avanzada del nuevo tejido óseo con escasa presencia del injerto residual, mientras que en el material con mayor proporción de silicio (B) persisten áreas de material no reabsorbido y una menor remodelación. Las imágenes comparativas ilustran el efecto de la composición química en la dinámica de regeneración ósea.

Crédito: Elaboración propia.



Imágenes: Unsplash

Más que relleno: sustitutos óseos inteligentes que ayudan al cuerpo a repararse

En pocas palabras, los sustitutos óseos inteligentes son como huéspedes educados: llegan, conviven sin causar molestias y además ayudan al cuerpo a repararse (Montoya et al., 2021). Pero su característica más importante es que son bioactivos, es decir, liberan iones como calcio, fósforo o silicio, que estimulan a las células osteoblásticas, las encargadas de formar hueso (Hoppe, 2011; Wu, 2013). Esta estimulación promueve la producción de proteínas responsables de la mineralización, lo que permite la formación progresiva de nuevo tejido óseo (Intravaia, 2023).

Además, algunos de estos materiales tienen la capacidad de atraer células madre mesenquimales, que pueden diferenciarse en osteoblastos, contribuyendo así al proceso de regeneración (Li, 2022). También inducen la formación de vasos sanguíneos (un proceso conocido como angiogénesis), lo cual es crucial para garantizar el suministro de oxígeno y nutrientes al nuevo tejido en desarrollo (Zhao, 2021; Li, 2025).

A diferencia de materiales tradicionales como el cemento óseo, que son inertes, los sustitutos inteligentes tienen una respuesta activa y funcional con el entorno biológico (Sohn & Oh, 2019). Por eso se les llama así: no piensan, pero responden a su entorno mediante mecanismos que estimulan la regeneración ósea.

De la ciencia al quirófano: ejemplos que ya son una realidad

Quizá te preguntes: ¿todo esto suena a ciencia ficción o ya es una realidad? La respuesta es que sí, muchos de estos sustitutos ya se utilizan en pacientes en hospitales y clínicas especializadas. Por ejemplo, los vidrios bioactivos, compuestos por silicio, calcio, sodio y fósforo, se emplean en cirugías ortopédicas, odontológicas y maxilofaciales (Ellakwa, 2025). Este material no solo es compatible con el hueso, sino que también forma una capa de apatita en su superficie

al entrar en contacto con fluidos corporales. Esta capa de apatita es similar al hueso y promueve la unión con el tejido óseo. Algunas variantes están enriquecidas con elementos como sodio o silicio, que les otorgan propiedades antibacterianas útiles en casos de infecciones óseas (Hench, 2006; Rahaman, 2011; Zhang, 2010; Ellakwa, 2025). En la Figura 3 se presenta la imagen de un fémur de un estudio preclínico: primero se observa el hueso recién implantado con el material de relleno y semanas después, el mismo hueso regenerado, donde el relleno se ha degradado.

También se utilizan materiales como la hidroxiapatita sintética (HA) o los fosfatos de calcio, compuestos similares a los que se encuentran naturalmente en el hueso humano. La HA se emplea ampliamente como relleno óseo debido a su similitud química con el mineral óseo nativo, lo que sustenta su excelente biocompatibilidad y osteoconductividad (Trzaskowska, 2024). Su porosidad favorece la infiltración celular y el intercambio de nutrientes, factores cruciales para la regeneración ósea (Trzaskowska, 2024; Wei, 2024). No obstante, la HA presenta ciertas limitaciones: su tasa de biodegradación es relativamente lenta en comparación con los vidrios bioactivos o cerámicas de silicofosfatos de calcio, lo que puede dificultar la sustitución progresiva del andamiaje por

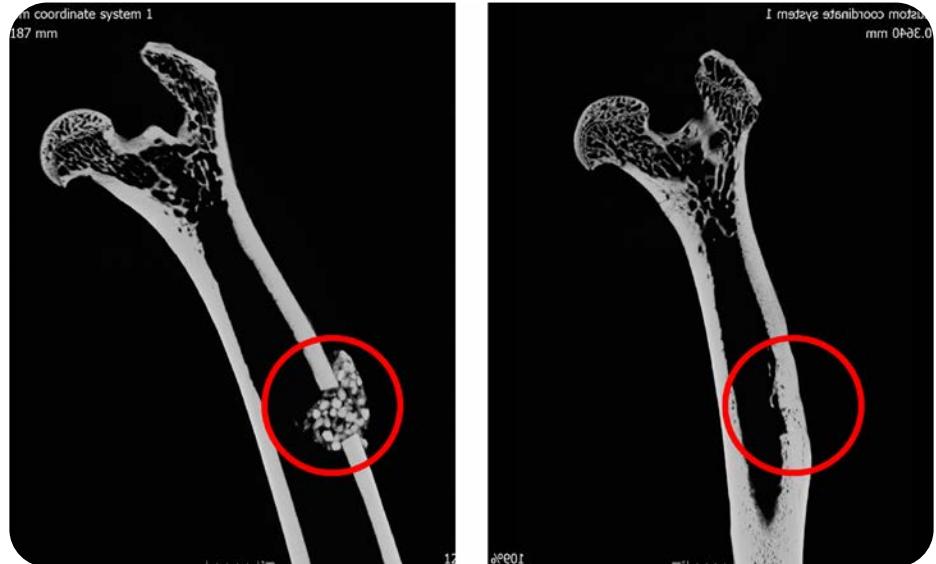


Figura 3. Imágenes de un fémur en estudio preclínico. A la izquierda, hueso recién implantado con relleno óseo; a la derecha, el mismo hueso semanas después, mostrando regeneración ósea y degradación del relleno implantado.

Crédito: Elaboración propia.

tejido óseo nuevo (Kazimierczak, 2023). Estas limitaciones pueden abordarse mediante el diseño de compuestos y la optimización de los procesos de fabricación.

Más allá de curar fracturas: la importancia real de esta tecnología

Las fracturas y lesiones óseas afectan la movilidad, la independencia y la calidad de vida. Esta necesidad se vuelve aún más crítica en países como México, donde el envejecimiento de la población y el aumento de enfermedades como la osteoporosis o la diabetes afectan directamente la salud ósea (Romero-Díaz, 2021; Carlos-Rivera, 2024). Estas condiciones hacen que el hueso pierda su capacidad de regenerarse de forma natural y

eficaz, especialmente en lesiones complejas o de gran tamaño (Sohn & Oh, 2019).

En estos casos, es necesario recurrir a materiales que puedan sustituir o apoyar el tejido dañado para restaurar su función. El desarrollo de sustitutos óseos inteligentes fabricados nacionalmente no solo representa un avance tecnológico, sino también una oportunidad estratégica para mejorar la atención médica especializada y fortalecer la autosuficiencia en salud (Intravaia, 2023; Montoya, 2021).

Los sustitutos óseos inteligentes representan una solución:

- Más segura, al minimizar la respuesta inflamatoria y reducir riesgos de infecciones.
- Mayor disponibilidad, al no depender de donantes humanos ni animales.
- Más versátil, al poder personalizarse e incluso fabricarse con impresión 3D.
- Más eficaz, al integrarse gradualmente con el tejido huésped y favorecer una recuperación ósea funcional en tiempos más cortos.

Los grandes retos: del laboratorio a la vida real

Llevar estos sustitutos desde el laboratorio hasta la práctica clínica en México continúa siendo un desafío. Solo una pequeña fracción de los avances llega a convertirse en productos accesibles para los pacientes, debido a obstáculos como los exigentes procesos regulatorios, las diferencias entre los tiempos y prioridades de la academia y la industria, y los altos costos y largos plazos requeridos para su desarrollo (Montoya, 2021).

Para trasladar un biomaterial del laboratorio a su aplicación clínica es necesario demostrar, mediante evidencia, su seguridad, eficacia y reproducibilidad en condiciones reales de uso. Esto conlleva procesos que pueden llevar entre 5 y 10 años, así como costos elevados que deben cubrir instituciones de investigación o el sector privado que cuente con la infraestructura y capacidad necesaria.

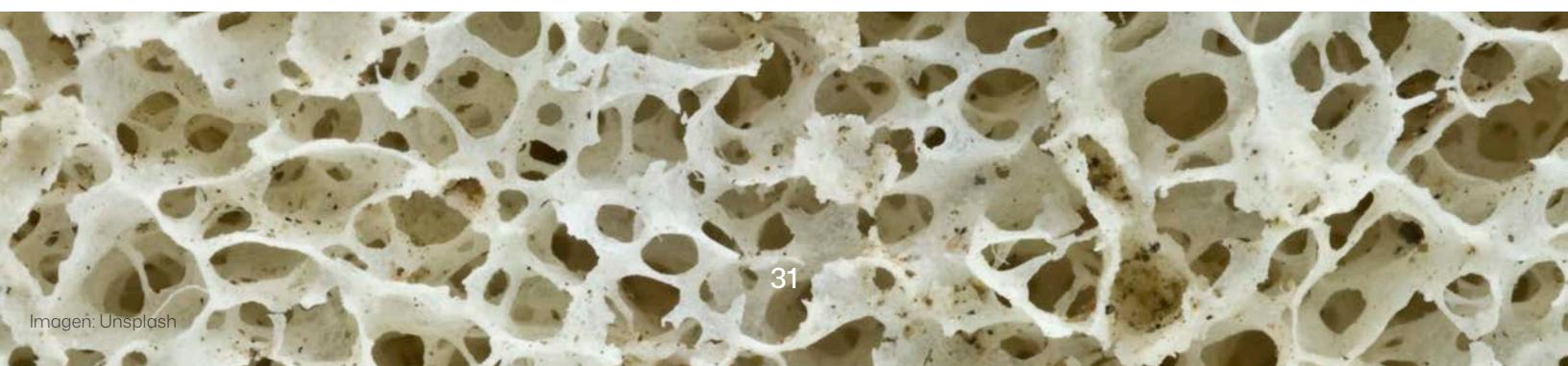
A esto se suman tres retos adicionales: la escalabilidad en la producción, que aún limita la fabricación masiva de biomateriales avanzados; los costos de materias primas, que restringen el acceso a tecnologías como los silicofosfatos de calcio o los andamios personalizados por impresión 3D; y la falta de estudios clínicos a largo plazo, necesarios para garantizar seguridad y eficacia en distintos

grupos de pacientes (Intravaia, 2023; Zhu, 2025). Por ello, aunque la investigación avanza rápidamente, solo una pequeña parte logra superar las etapas técnicas y regulatorias necesarias para llegar al mercado.

A pesar de estas barreras, la investigación continúa avanzando hacia estrategias más complejas y prometedoras, como la combinación de los sustitutos óseos con células madre mesenquimales y factores de crecimiento como las proteínas morfogenéticas óseas (BMPs) o el factor de crecimiento vascular (VEGF). Estas estrategias prometen acelerar la regeneración y mejorar la integración del material con el cuerpo. Sin embargo, aún enfrentan el reto de lograr que las células sobrevivan y funcionen de forma estable dentro del implante, así como el alto costo de producir y regular este tipo de terapias avanzadas (Intravaia, 2023; Montoya, 2021).

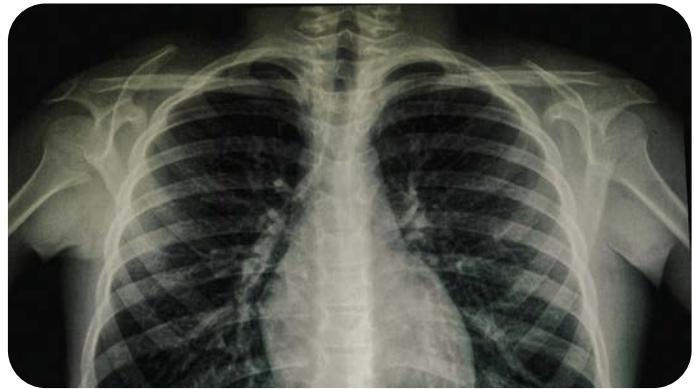
No obstante, el crecimiento del mercado global y la urgencia médica por soluciones más eficaces están impulsando esfuerzos conjuntos entre universidades, autoridades sanitarias e industria. La creación de equipos multidisciplinarios, el establecimiento de programas de apoyo económico y fortalecimiento normativo son estrategias clave para acelerar esta transición y convertir los avances científicos en beneficios tangibles para la sociedad (Montoya, 2021; Zhu, 2025).

Sin embargo, es fundamental que el desarrollo y la implementación de biomateriales implantables consideren no sólo los criterios técnicos y regulatorios, sino también la responsabilidad ética de proteger la salud y seguridad de los pacientes. La investigación debe garantizar un acceso equitativo a estas tecnologías, buscando soluciones accesibles a largo plazo, es decir cuando se convierta en producto, evaluando cuidadosamente los riesgos y beneficios antes de su uso clínico y promoviendo prácticas transparentes que fortalezcan la confianza de la sociedad en la innovación biomédica.



Un futuro donde la ciencia ayuda al cuerpo a reconstruirse

Volviendo a la pregunta inicial —¿qué pasa cuando un hueso no puede sanar por sí solo?— hoy sabemos que la ciencia ya ofrece una respuesta: los sustitutos óseos inteligentes. Al combinar ciencia, tecnología y biocompatibilidad, estos materiales abren la puerta a tratamientos más seguros, eficaces y accesibles para millones de personas. Su desarrollo no solo responde a una necesidad clínica urgente, sino que también simboliza un paso hacia la soberanía tecnológica en salud. Invertir en estas soluciones es apostar por un futuro donde la ciencia mexicana no sólo cura, sino que transforma vidas, de manera responsable y equitativa.



Imágenes: Unsplash

Referencias

- Carlos-Rivera, F., Guzmán-Caniupan, J. A., Camacho-Cordero, L. M., Aubry de Maraumont, T., & Soria-Suárez, N. (2024). Estimated frequency and economic burden of incident fragility fractures during 2023 in Mexico. *Archives of Osteoporosis*, 19(1), 109.
- Ellakwa, D. E., Abu-Khadra, A. S., & Ellakwa, T. E. (2025). Insight into bioactive glass and bio-ceramics uses: Unveiling recent advances for biomedical application. *Discover Materials*, 5(1), 78. <https://doi.org/10.1007/s43939-025-00254-2>
- Hench, L. L. (2006). The story of Bioglass®. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 17(11), 967–978. <https://doi.org/10.1007/s10856-006-0432-z>
- Hofmann, G. H., Sarsour, R., van Deursen, W., Alayleh, A., Duru, N., Whitaker, E., & Shea, K. G. (2025). Immune rejection of orthopedic tissue allograft scoping review: Are we missing a cause of graft/procedural failure? Current concepts. *Journal of ISAKOS: Joint Disorders & Orthopaedic Sports Medicine*, 5(1), 101002. <https://doi.org/10.1016/j.jisako.2025.101002>
- Hoppe, A., Güldal, N. S., & Boccaccini, A. R. (2011). A review of the biological response to ionic dissolution products from bioactive glasses and glass-ceramics. *Biomaterials*, 32(11), 2757–2774. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2011.01.004>
- Intravaia, J. T., Graham, T., Kim, H. S., Nanda, H. S., Kumbar, S. G., & Nukavarapu, S. P. (2023). Smart orthopedic biomaterials and implants. *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 25, 100439. <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2023.100439>

Jiang, S., Wang, M., & He, J. (2021). A review of biomimetic scaffolds for bone regeneration: Toward a cell-free strategy. *Bioengineering & Translational Medicine*, 6(2), e10206. <https://doi.org/10.1002/btm2.10206>

Kazimierczak, P., Wessely-Szponder, J., Palka, K., Barylyak, A., Zinchenko, V., & Przekora, A. (2023). Hydroxyapatite or fluorapatite—which bioceramic is better as a base for the production of bone scaffold?—A comprehensive comparative study. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(6), 5576. <https://doi.org/10.3390/ijms24065576>

Li, X., Xie, J., Yuan, X., Xia, Y., & Ding, J. (2025). Angiogenic biomaterials for tissue regeneration: Advances and perspectives. *Advanced Healthcare Materials*, 14(3), 2401211. <https://doi.org/10.1002/adhm.202401211>

Li, Y., Chen, S., He, Y., Chen, Y., Xu, Y., & Guo, Y. (2022). Mesenchymal stem cell–biomaterial interactions and their contributions to bone regeneration. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 822211. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.822211>

Łuczak, J. W., Palusińska, M., Matak, D., Pietrzak, D., Nakielski, P., Lewicki, S., ... & Szymański, Ł. (2024). The future of bone repair: emerging technologies and biomaterials in bone regeneration. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(23), 12766. <https://doi.org/10.3390/ijms252312766>

Montoya, C., Du, Y., Gianforcaro, A. L., Orrego, S., Yang, M., & Lelkes, P. I. (2021). On the road to smart biomaterials for bone research: Definitions, concepts, advances, and outlook. *Bone Research*, 9(1), 12. <https://doi.org/10.1038/s41413-021-00146-2>

Rahaman, M. N., Day, D. E., Bal, B. S., Fu, Q., Jung, S. B., Bonewald, L. F., & Tomsia, A. P. (2011). Bioactive glass in tissue engineering. *Acta Biomaterialia*, 7(6), 2355–2373. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2011.03.016>

Romero-Díaz, C., Duarte-Montero, D., Gutiérrez-Romero, S. A., & Mendivil, C. O. (2021). Diabetes and bone fragility. *Diabetes Therapy*, 12(1), 71–86. <https://doi.org/10.1007/s12325-020-01604-3>

Santoro, A., Voto, A., Fortino, L., Guida, R., Laudisio, C., Cillo, M., & D’Ursi, A. M. (2025). Bone defect treatment in regenerative medicine: exploring natural and synthetic bone substitutes. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(7), 3085. <https://doi.org/10.3390/ijms26073085>

Sohn, H.-S., & Oh, J.-K. (2019). Review of bone graft and bone substitutes with an emphasis on fracture surgeries. *Biomaterials Research*, 23(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s40824-019-0162-2>

Trzaskowska, M., Vivcharenko, V., Benko, A., Franus, W., Goryczka, T., Barylski, A., ... & Przekora, A. (2024). Biocompatible nanocomposite hydroxyapatite-based granules with increased specific surface area and bioresorbability for bone regenerative medicine applications. *Scientific Reports*, 14(1), 28137. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-28137-9>

Wei, P., Zhou, J., Xiong, S., Yi, F., Xu, K., Liu, M., ... & Xiong, L. (2024). Chestnut-inspired hollow hydroxyapatite 3D printing scaffolds accelerate bone regeneration by recruiting calcium ions and regulating inflammation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16(8), 9768–9786. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c19876>

Wu, C., Zhou, Y., Xu, M., Han, P., Chen, L., Chang, J., & Xiao, Y. (2013). Copper-containing mesoporous bioactive glass scaffolds with multifunctional properties of angiogenesis capacity, osteostimulation and antibacterial activity. *Biomaterials*, 34(2), 422–433. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2012.09.066>

Zhang, D., Leppäranta, O., Munukka, E., Ylänen, H., Viljanen, M. K., Eerola, E., & Hupa, M. (2010). Antibacterial effects and dissolution behavior of six bioactive glasses. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 93(2), 475–483. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.32564>

Zhao, S., Zhang, J., Zhu, M., Zhang, Y., Liu, Z., Tao, C., & Zhu, Y. (2021). Three-dimensional printed strontium-containing mesoporous bioactive glass scaffolds for repairing critical-sized bone defects. *Acta Biomaterialia*, 126, 569–581. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2021.03.048>

Zhu, Y., Zhang, X., Chang, G., Deng, S., & Chan, H. F. (2025). Bioactive glass in tissue regeneration: Unveiling recent advances in regenerative strategies and applications. *Advanced Materials*, 37(2), 2312964. <https://doi.org/10.1002/adma.202312964>



Dr. Juan José Martínez Sanmiguel
Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI).
C.P.76125, Santiago de Querétaro, Querétaro, México

Doctor en Inmunobiología, con formación como cirujano dentista. Su trabajo se centra en la investigación traslacional y aplicada en dispositivos médicos y biomateriales inteligentes, con énfasis en sustitutos óseos, recubrimientos bioactivos y sistemas de liberación controlada. Ha impulsado proyectos que fortalecen la ciencia en México y contribuyen a la salud, la soberanía tecnológica y la calidad de vida.

✉ juanjose.martinez@cidesi.edu.mx

📞 8116965398



Dra. Bárbara Moreno Murguía
Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI).
C.P.76125, Santiago de Querétaro, Querétaro, México

Doctora en Ciencia e Ingeniería de Materiales por la UNAM, con formación en Física, participa en proyectos de desarrollo de biocerámicos, incluyendo un relleno óseo de silicofosfatos de calcio, donde coordina el escalamiento, caracterización y cumplimiento normativo, con enfoque en fortalecer capacidades nacionales en sustitutos de hueso y promover soluciones innovadoras para la regeneración ósea.