



## Quitosán y fluoruro de sodio para la conservación sostenible de restos óseos

Luisa Straulino Mainou, Luisa Mainou Cervantes

**Resumen:** Este artículo presenta dos sustancias para la conservación de hueso que pueden utilizarse juntas o separadas, dependiendo de su composición química: fluoruro de sodio y quitosán. A diferencia de las técnicas tradicionales con polímeros sintéticos, este enfoque trata tanto la parte inorgánica (mineral) como la orgánica (colágeno). El fluoruro de sodio promueve la remineralización formando fluorapatita, lo que mejora la estabilidad; mientras que el quitosán, un biopolímero con propiedades antibacterianas, puede compensar la pérdida de colágeno, aumentando su resistencia mecánica. Su aplicación desde 1995 en la CNCPC, México, ha resultado exitosa para tratar elementos óseos históricos, arqueológicos y fósiles. Además, previene el crecimiento microbiano y es menos invasivo que otras técnicas de consolidación porque no hace capas en superficie ni rellena espacios, permitiendo la conservación sin alteración estructural. Las características de ambas sustancias las posicionan como una opción más sostenible que las opciones tradicionales de tratamiento de hueso. El estudio detalla los procedimientos de preparación, métodos de aplicación y casos de estudio que demuestran su efectividad.

**Palabras clave:** remineralización, bioconsolidación, consolidación, fluoruro de sodio, quitosán, hueso, sostenibilidad, restauración

### Chitosan and sodium fluoride for the sustainable preservation of skeletal remains

**Abstract:** This paper presents two substances that can be used together or apart (depending on the chemistry of the bones to be treated) for the conservation of bone: sodium fluoride and chitosan. Unlike traditional consolidation techniques with synthetic polymers, this approach addresses both the inorganic (mineral) and organic (collagen) components of bone. Sodium fluoride promotes remineralization by forming fluorapatite, which enhances stability, while chitosan, a biopolymer with antibacterial properties, can compensate for lost collagen, improving mechanical resistance. Their application since 1995 at the CNCPC in Mexico, has been successful in treating historical and fossilized remains. It prevents microbial growth and is less invasive than other conservation techniques because it does not create superficial layers or mineral fillings, making it suitable for conservation while maintaining structural integrity. The characteristics of both substances make them a more sustainable option for treating bones than the traditional ones. The study includes detailed preparation procedures, application methods, and case studies demonstrating the technique's effectiveness.

**Keywords:** remineralization, bioconsolidation, consolidation, sodium fluoride, chitosan, bone, sustainability, restoration

### Quitosana e fluoreto de sódio para a preservação sustentável de restos ósseos

**Resumo:** Este artigo apresenta duas substâncias para a conservação de ossos que podem ser utilizadas em conjunto ou separadamente, dependendo da sua composição química: fluoreto de sódio e quitosana. Ao contrário das técnicas tradicionais com polímeros sintéticos, este método trata tanto a parte inorgânica (mineral) como a orgânica (colágeno). O fluoreto de sódio promove a remineralização formando fluorapatite, o que melhora a estabilidade; enquanto a quitosana, um biopolímero com propriedades antibacterianas, pode compensar a perda de colágeno, aumentando a sua resistência mecânica. A sua aplicação desde 1995 no CNCPC, México, tem sido bem-sucedida no tratamento de elementos ósseos históricos, arqueológicos e fósseis. Além disso, previne o crescimento microbiano e é menos invasiva do que outras técnicas de consolidação, pois não forma camadas superficiais nem preenche espaços, permitindo a conservação sem alteração estrutural. As características de ambas as substâncias posicionam-nas como uma opção mais sustentável em comparação com os tratamentos ósseos tradicionais. O estudo detalha os procedimentos de preparação, métodos de aplicação e casos de estudo que comprovam a sua eficácia.

**Palavras-chave:** remineralização, bioconsolidação, consolidação, fluoreto de sódio, quitosana, osso, sustentabilidade, restauro

## Introducción

El hueso es un biomineral compuesto por bioapatita (69%), colágeno tipo I (22%), y agua (9%); la primera está formada por cristales de fosfato de calcio carbonatado de tamaño nanométrico y de forma elongada, alineados en el eje longitudinal de la matriz orgánica y otras biomacromoléculas. La dureza y la resistencia del hueso están proporcionadas por la parte mineral y la función del colágeno es proporcionar soporte y resistencia a la tracción. Los dientes están formados también por bioapatita, colágeno y otras proteínas; no obstante, las concentraciones de material orgánico son menores que en el hueso y en el esmalte llega a ser de solo 10% (Von Euw *et al.* 2019; Berkovitz y Shellis 2018; Georgiadis, Müller y Schneider 2016).

Los restos de un vertebrado, al incorporarse a la litósfera, inician una serie de procesos tafonómicos que pueden favorecer la conservación o la degradación de su esqueleto. Una de las formas de conservación del tejido óseo es cuando además de la recristalización de la apatita, se incorpora flúor a su estructura formando fluorapatita, más estable químicamente que la bioapatita; por ello muchos fósiles óseos se han transformado parcial o totalmente en fluorapatita (Kendall *et al.* 2018; Keenan 2016; Merino y Morales 2008; Wopenka y Pasteris 2005; Person *et al.* 1995).

Para el tratamiento convencional de elementos óseos degradados suelen aplicarse polímeros sintéticos como consolidantes. Los más utilizados son el Paraloid® (B72 o B44) (polimetilmetacrilato), el Butvar®B-98 o Mowital® B60H (polivinilbutirales). En algunas partes del mundo, como en México, también se utiliza Resistol® 850 (acetato de polivinilo en emulsión) en acciones de conservación aplicadas por paleontólogos, antropólogos físicos y arqueólogos (Howie 1984; Koob 1984; Cimino *et al.* 2014; Abdel-Maksoud, Kira y Mohamed 2022). Además, existen otras alternativas (menos extendidas o en fase experimental) basadas en la formación de minerales específicos como el uso de hidroxiapatita, fosfato diamónico, silicatos o nanopartículas de calcio que forman minerales cristalinos o amorfos que se depositan en la superficie y/o en cavidades óseas, cementando las partículas disgregadas (Marín-Ortega, Iglesias-Campos y Calvo i Torras 2024; Porpora *et al.* 2022; Díaz-Cortés *et al.* 2022; Liu *et al.* 2021; North, Balonis y Kakoulli 2016).

No obstante, las sustancias aquí propuestas son dos: el fluoruro de sodio que se usa para intervenir la parte inorgánica tomando como referencia a los campos médico y odontológico, y el quitosán, que puede reemplazar algunas de las propiedades del hueso que se pierden cuando el colágeno se degrada. Estos procedimientos fueron desarrollados desde 1995 en la Coordinación Nacional de Conservación del Patrimonio Cultural (CNCPC, México) por la primera autora, quien contó con el asesoramiento del químico Manuel Salmónt, que le recomendó explorar el quitosán.

## Justificación

Aunque los polímeros sintéticos presentan ventajas (rapidez de actuación, útil en intervenciones de campo y su “reversibilidad<sup>[1]</sup>”), no hay que olvidar que son materiales filmógenos que forman capas superficiales en el hueso cortical y que recubren las paredes de la trabécula y las paredes de las grietas. Entonces, el “endurecimiento” del hueso corresponde al del polímero y no a una restitución intrínseca de las propiedades del material óseo, ocasionando resultados insatisfactorios ya que la desmineralización y la pérdida de colágeno no se resuelven. Además, estas películas tienden a sellar los poros óseos, representando un riesgo en presencia de sales solubles y suelen tener problemas en cuanto a su eliminación efectiva interfiriendo en análisis de superficie e isotópicos (Moreiras *et al.* 2023; Brock *et al.* 2018; López-Polín 2012).

La consolidación con minerales modifica la microestructura del hueso rellenando sus cavidades de forma similar a un proceso artificial de permineralización<sup>[2]</sup>, elevando el peso del hueso tratado; además, suelen tornarse duros, frágiles y sin su flexibilidad característica.

Las sustancias aquí presentadas son una alternativa ya que resuelven algunos de los problemas mencionados. Su mecanismo de acción difiere sustancialmente ya que reestablecen algunas propiedades del hueso como dureza y flexibilidad, sin cambiar su microestructura, sin generar películas superficiales y sin aumentar significativamente el peso de los huesos tratados. Los residuos, al ser sustancias naturales, no son tóxicos para los usuarios y se incorporan al ambiente sin contaminarlo.

## La parte inorgánica del hueso

### —El apatito (apatita)

El término apatita ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{OH},\text{Cl})$ ) alude a un grupo de minerales fosfatados de los cuales la fluorapatita, hidroxiapatita y clorapatita son los únicos aceptados por la Asociación Mineralógica Internacional. Su estructura cristalina es proclive a sustituciones químicas pudiendo acomodar aproximadamente a la mitad de los elementos de la tabla periódica. Estas sustituciones modifican ligeramente la estructura del mineral repercutiendo en su solubilidad, dureza, fragilidad y estabilidad térmica. Dentro de la estructura cristalina de la apatita pueden darse intercambios atómicos: los grupos hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ), el flúor ( $\text{F}^-$ ) y el cloro ( $\text{Cl}^-$ ), pueden intercambiarse entre ellos; los fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) pueden sustituirse por carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), arsenatos ( $\text{AsO}_4^{3-}$ ) o silicatos ( $\text{SiO}_4^{4-}$ ), y al ion calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) lo pueden remplazar múltiples iones metálicos (Hughes and Rakovan, 2002; Wopenka and Pasteris 2005). El F- debido a su pequeño radio iónico es el que mejor se adapta a la estructura cristalina de la apatita. Por ello, la fluorapatita es el mineral del grupo con mayor

simetría y estabilidad en comparación con los OH<sup>-</sup> de la hidroxiapatita que no son esféricos lo que le confiere una simetría y estabilidad menores (Wopenka y Pasteris 2005; Kohn, Rakovan y Hughes 2002).

Tradicionalmente, se describe al mineral del hueso como hidroxiapatita, Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(OH), pero su estructura coincide mejor con la de una apatita carbonatada (CO<sub>3</sub>AP) de tamaño nanométrico y en forma de placa (aproximadamente 3 x 25 x 50 nm) dotando al hueso de una gran superficie de reacción (100 m<sup>2</sup>/g). La bioapatita es estructuralmente desordenada y de composición no estequiométrica resultado de la presencia de múltiples especies catiónicas (como Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>) y aniónicas (como HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>), así como vacantes en la red cristalina. Todo ello ocasiona que el mineral tenga alta reactividad y un grado de solubilidad elevado en comparación a la hidroxiapatita inorgánica (Von Euw *et al.*, 2019; Wopenka y Pasteris 2005; Elliot 2002).

El flúor y el fluoruro de sodio

El flúor (F) es el elemento más electronegativo, es univalente y en muchos compuestos la estequímica del F<sup>-</sup> se parece a la del OH<sup>-</sup> porque su radio iónico es similar. Para la remineralización dental y ósea *in vivo* se emplea en forma de fluoruro de sodio (NaF) que se disuelve a temperatura ambiente en agua (4 g en 100 ml). Las soluciones al 0,5-1 % presentan un pH aproximado de 6,7 aunque éste puede variar ligeramente según el tipo y cantidad de impurezas presentes. La reacción del flúor (F<sup>-</sup>)

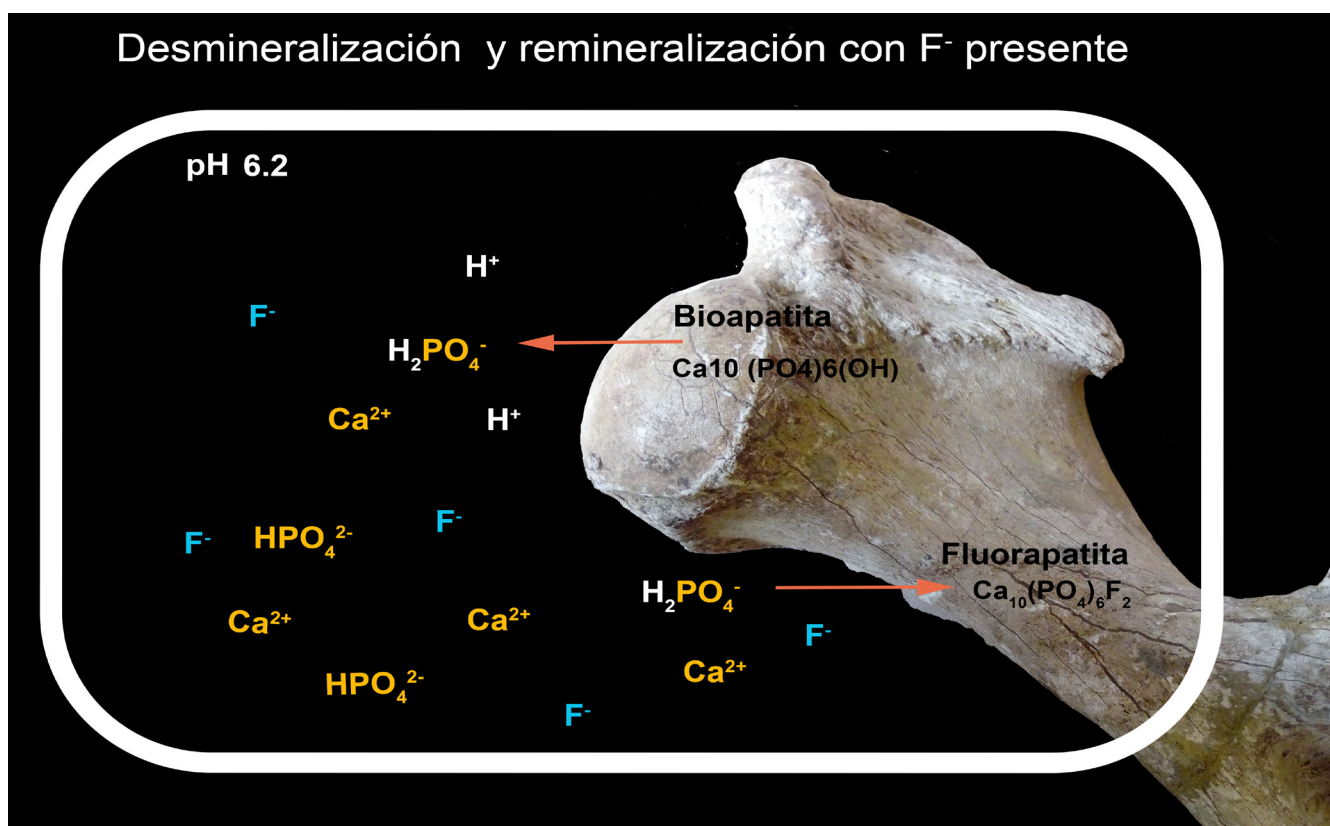
con el calcio (Ca<sup>2+</sup>) y el magnesio (Mg<sup>2+</sup>) tiene relevancia biológica ya que forman complejos con el flúor en el organismo volviéndose altamente insolubles (Johnston y Strobel 2020; Jha *et al.* 2011; Thomas y Reeves 1997).

#### — Remineralización<sup>[3]</sup> y la formación de fluorapatita

La remineralización es un proceso de conservación distinto al de la consolidación, ya que actúa directamente a nivel iónico, sustituyendo OH<sup>-</sup> por F<sup>-</sup>, formando fluorapatita que contrarresta la desmineralización diagenética y recuperando la dureza. Esta reacción sucede rápidamente en la superficie del esmalte en aplicaciones odontológicas; sin embargo, también puede tener lugar en los huesos y dientes fósiles durante el enterramiento, cuando el F<sup>-</sup> que se localiza en las soluciones del entorno se incorpora a su estructura (Sivapriya *et al.* 2017; Keenan 2016; Hedges 2002; Newsley 1989).

El flúor también se usa para la prevención y tratamiento de caries incipientes, por inhibición de las enzimas celulares de las bacterias o permitiendo la permeabilidad de sus membranas celulares, favoreciendo así la desinfección y conservación de los elementos tratados (Rošin-Grget *et al.* 2013; Sanshu y Breaker 2012). Este efecto es relevante para la conservación puesto que permite que las soluciones de flúor sean utilizadas como sustancias bactericidas y bacteriostáticas.

La desmineralización ocurre cuando el pH del entorno desciende a niveles críticos de 5,5 para el esmalte y 6,2



**Figura 1.-** Proceso de desmineralización y remineralización en presencia del ion flúor. Se observan todas las especies iónicas en la solución cuando hay un pH crítico de 6,2 para hueso o dentina (para el esmalte es de 4,5 y 5,5).

para la dentina y el hueso, favoreciendo la disolución de la bioapatita. Cuando el  $F^-$  está presente en soluciones acuosas y entra en contacto con el tejido óseo y dental reemplaza a los  $OH^-$  en la red cristalina. Este proceso ocurre espontánea y rápidamente a temperatura ambiente debido a la alta electronegatividad del flúor ( $F^-$ ) que lo hace reaccionar fácilmente. A mayor concentración de flúor que se incorpora en el hueso, mayor será el tamaño del cristal de apatita lo que genera un mineral más estable y con menor solubilidad en medios ácidos [Figura 1] (López-González *et al.* 2018).

## La parte orgánica del hueso

### — Colágeno

El colágeno está compuesto por tres cadenas polipeptídicas formadas por repeticiones del tripéptido de glicina-prolina-hidroxiprolina, organizadas en hélices alfa levógiras<sup>[4]</sup>. Estas tres cadenas se ensamblan juntas para formar la característica estructura del colágeno en una triple hélice dextrógira (Sionkowska 2006; Collins *et al.* 1995).

Cada osteona en el hueso está formada por capas coaxiales de colágeno que se disponen helicoidalmente alrededor de un canal de Havers formando láminas. Las fibrillas de cada lámina son paralelas y cambian de orientación abruptamente formando planos ortogonales o arcos (Giraud-Guille, Belamie y Mosser 2004; Giraud-Guille 1988).

El colágeno del hueso presenta una temperatura de gelatinización inusualmente alta y una mayor estabilidad que el colágeno no mineralizado que se atribuye a que la presencia del mineral retarda la desnaturalización y la pérdida de péptidos. En general la pérdida de colágeno provoca una reorganización de la microestructura del tejido óseo (Kendall *et al.* 2018; Nielsen-Marsh y Hedges 2000; Collins *et al.* 1995).

### — Quitosán

La quitina ( $C_8H_{13}O_5N$ )<sub>n</sub> es un polisacárido insoluble en agua, y en la mayoría de los solventes orgánicos, que compone a los exoesqueletos de artrópodos, así como las paredes celulares de los hongos. Es el segundo polímero más abundante en la naturaleza, después de la celulosa y es similar a ésta. Contiene grupos acetamida ( $-NHCOCH_3$ ) que favorecen la formación de enlaces de hidrógeno entre cadenas, lo que le confiere al material una elevada resistencia mecánica. De la quitina se obtiene el quitosán (un grupo de quitinas parcial o totalmente desacetiladas) que es semicristalino, filmógeno y soluble en soluciones acuosas ligeramente ácidas. Su estructura molecular contiene grupos amino que hacen del quitosán el único polímero en la naturaleza. Mientras que la mayoría de los polisacáridos naturales como la celulosa son ácidos,

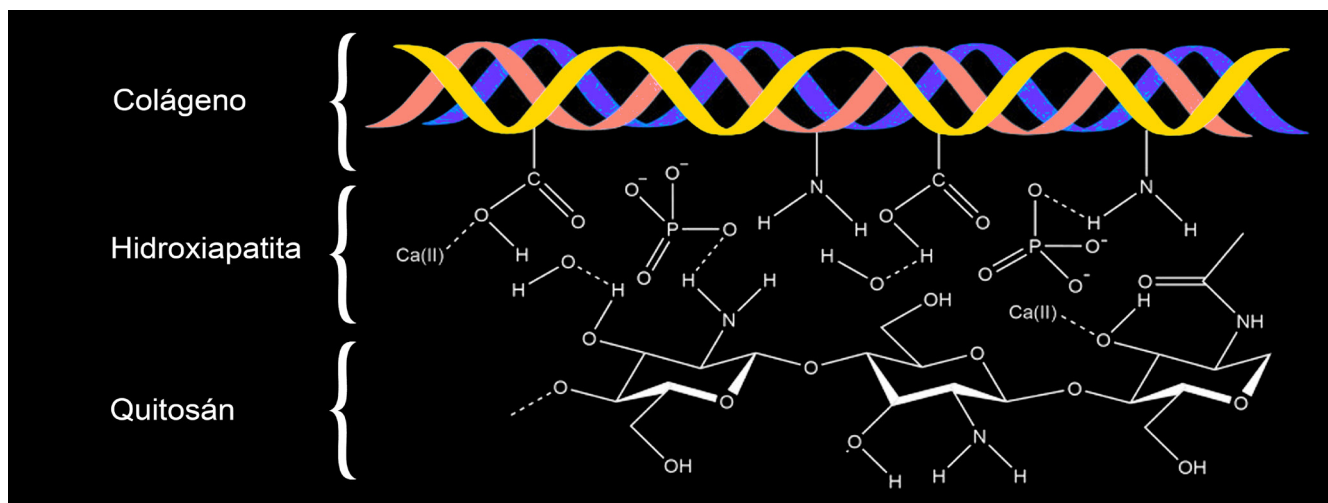
el quitosán tiene un comportamiento básico debido a su protonación derivada de los grupos amina. El quitosán es biorenovable, ya que se obtiene de desechos de exoesqueletos de crustáceos y de paredes celulares de algunos hongos (Aranaz *et al.* 2021; Rinaudo 2006; Dutta, Dutta y Tripathi 2004).

El quitosán tiene propiedades regenerativas en diversos tejidos, como el hueso y la piel, por lo que es biocompatible; no es tóxico, no es irritante y no es propenso a generar alergias, y además es biodegradable (Matica, Menghiu y Ostafe 2017; Giraldo 2015; Venkatesan *et al.* 2014). Presenta propiedades antibacterianas y antifúngicas ya que provoca lisis en sus células, desnatura sus enzimas e inhibe el ADN y la síntesis de ARN suprimiendo la esporulación (Kong *et al.* 2010; Martínez-Camacho *et al.* 2010). También tiene propiedades coagulantes y floculantes, siendo capaz de coagular hidrocarburos y polímeros derivados del petróleo. Se utiliza para hacer cementos endodónticos, formular nanomateriales de uso dental, realizar implantes orales, y en biomedicina se emplea en ingeniería de tejidos para huesos y piel, así como para su regeneración (Aranas *et al.* 2021; Croisier y Jérôme 2013; Venkatesan y Kim 2010; Dutta, Dutta y Tripathi 2004). Como se fabrica con diversos pesos moleculares, condiciona algunas de sus propiedades y la eficacia de sus aplicaciones en conservación. Por ejemplo, el de bajo peso molecular se adecua mejor para consolidar, mientras que el de alto peso molecular se emplea para procesos superficiales como la eliminación de películas poliméricas.

### — Bioconsolidación<sup>[6]</sup> de hueso con quitosán

El quitosán interactúa con el hueso por medio de puentes de hidrógeno<sup>[7]</sup> y de Van der Waals<sup>[8]</sup>, y cuando se prepara en bajas concentraciones, se observa un aumento en la dureza del complejo hueso/quitosán [Figura 2]. Asimismo, el incremento de la acidez en la solución de quitosán también aumenta la dureza del sistema hueso/quitosán. Se han realizado análisis mediante espectroscopía FTIR donde se observan variaciones en los espectros debido a la interacción de ambos compuestos. Además, mediante difracción de rayos X, se demostró que la cristalinidad aumenta en los compuestos de hueso/quitosán, tanto en hueso compacto como en hueso trabecular. Esto es importante debido a que una mayor cristalinidad se asocia con mayor estabilidad (Paz, Vasquez-García y Flores-Ramírez 2016; Paz 2013).

El quitosán se ha aprovechado como andamiaje para hueso sintético en medicina desde hace más de dos décadas y se ha documentado su eficacia en la mejora de la dureza del hueso (natural o artificial), así como la biocompatibilidad de implantes óseos. La aplicación de recubrimientos de quitosán sobre hidroxiapatita sintética ha logrado mejorar su resistencia a la compresión (Rashed, Misnan y Nawi 2023; Escobar y Mesa 2019; Venkatesan *et al.* 2014; Ezoddini-Ardakani *et al.* 2012; Venkatesan y Kim 2010).



**Figura 2.-** Enlaces formados entre la molécula del quitosán y los componentes del hueso: hidroxiapatita y colágeno. Tomado y modificado de: (Becerra *et al.* 2022)

### ¿Cómo y cuándo utilizar estos productos?

En adelante se presentarán casos donde se utilizaron quitosán y fluoruro de sodio de diversas maneras; estos corresponden a casos de estudio seleccionados de los múltiples que se han trabajado con estos productos en la CNCPC-INAH y que demuestran su utilidad para resolver algunos problemas. Las restauraciones realizadas en cada caso consistieron en procesos de intervención diferentes; sin embargo, sólo detallaremos lo correspondiente a los productos en cuestión detallando la finalidad de su uso y su justificación, las concentraciones, las técnicas y los resultados obtenidos.

#### — Para huesos reblandecidos

Esqueleto de Aquiles Serdán (héroe de la Revolución Mexicana de 1910).

Este esqueleto se conservó durante décadas en una urna dentro de un monumento. Las autoridades gubernamentales y culturales decidieron en 2017 trasladarlos al Museo de la Revolución, ubicado en la que fue su casa, y hacer un homenaje de cuerpo presente ante sus descendientes. Durante su enterramiento en el monumento hubo filtraciones de agua, por lo que el contacto directo y persistente con ella generó una disminución de las propiedades físico-mecánicas del material óseo que tenía la apariencia y sensación táctil de una tiza mojada. Los huesos presentaban un mal estado de conservación: disgregación, pulverulencia, alta porosidad, pérdida de tejido cortical y cristales en la cortical o en el hueso trabecular. No podían ser manipulados sin que se fragmentaran o pulverizaran de manera irremediable [Figura 3A].

Al no poderse manipular por su fragilidad, los huesos se remineralizaron dentro de la urna. Esto se realizó con una solución de fluoruro de sodio en agua destilada al 1% por aspersión con un pulverizador de mano [Figura 4A]. Se aplicó cada 24 horas durante 60 días. Posteriormente, se aplicó el bioconsolidante por aspersión con pulverizador. Una vez

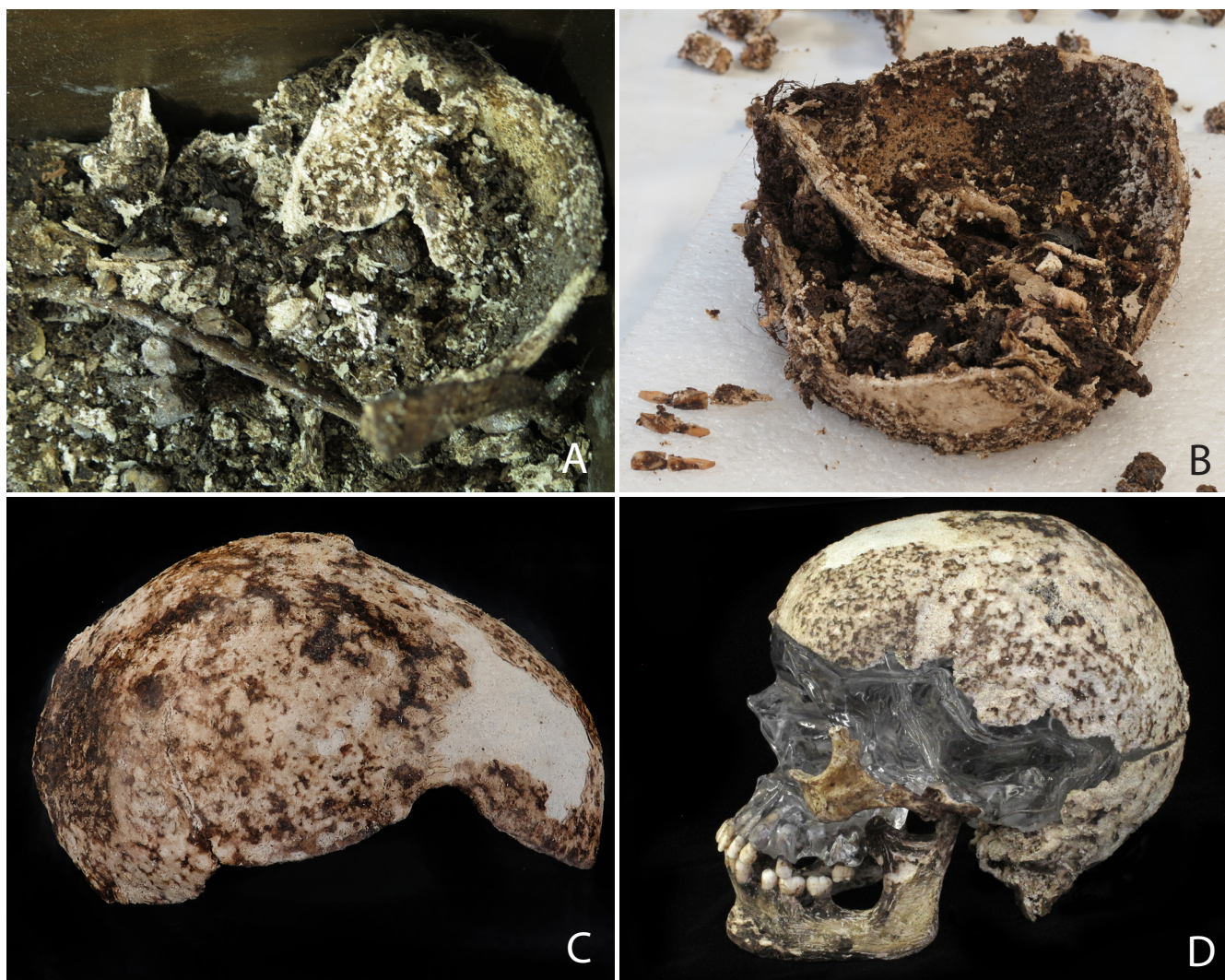
que adquirieron dureza y resistencia se colocó el producto 5 veces más, con pincel plano de cerdas suaves de pelo sintético, dejando secar entre cada aplicación [Figura 4B].

La remineralización y la consolidación dieron un excelente resultado: el esqueleto pudo ser retirado de la urna sin más fracturación de la ya existente [Figura 3B], los huesos se pudieron manipular para un análisis de antropología física [Figura 3C], y el cráneo se pudo montar en un soporte hecho exprofeso para dignificarlo para el homenaje [Figura 3D]. Además, el tratamiento conjunto sirvió como medida profiláctica ya que el esqueleto aún contaba con material orgánico en pudrición.

#### — Huesos expuestos a la intemperie o que permanecieron en ambientes con ciclos de humedad y secado y/o con crecimiento fúngico.

Esqueletos atribuidos a Miguel Hidalgo y Costilla, Ignacio Allende, Ignacio Aldama y Mariano Jiménez (héroes de la Independencia de México de 1810).

Durante la Guerra de Independencia Mexicana (1810-1821), se fusilaron y decapitaron a estos 4 próceres en Chihuahua. El cuerpo de Hidalgo fue enterrado en el convento de San Francisco y los otros tres en el cementerio de la ciudad. Sus cabezas fueron enviadas a Guanajuato y colgadas en la Alhóndiga de Granaditas durante diez años, y fueron sepultadas en 1821. Sus cuerpos y las cabezas fueron exhumados en 1823 para ser trasladados a la catedral metropolitana de la Ciudad de México, después de un suntuoso funeral público. En 1910 fueron lavados con sosa caustica, detergente y secados al sol como parte de los festejos del centenario de la independencia de México. En 1925, fueron nuevamente trasladados de la catedral al mausoleo del Monumento a la Independencia, y en 2010 en el marco del bicentenario, los héroes de la independencia fueron llevados al Museo Nacional de Historia donde se conservaron por profesionales, y fueron estudiados por antropólogos físicos e historiadores. Tras su análisis, se



**Figura 3.-** Ejemplo del estado de conservación del esqueleto. Sólo se muestra el cráneo. A) Estado de conservación antes de su intervención dentro de la urna funeraria. B) Extracción del cráneo después de la remineralización. C) Calota del cráneo restaurada. D) Aspecto final del cráneo y mandíbula después de su montaje.



**Figura 4.-** A) Proceso de remineralización por aspersión con pulverizador. El frágil estado de conservación de este cráneo no permitía que se extrajera de la urna funeraria por lo que el proceso se realizó dentro de la urna. B) Bioconsolidación. Después de aplicar el fluoruro de sodio como remineralizador se continuó la intervención mediante la aplicación de quitosán con pincel plano de cerdas sintéticas.



**Figura 5.-** A) Estado de conservación de los esqueletos de Hidalgo, Jiménez, Aldama y Allende antes de ser intervenidos en 2010. Estos huesos largos presentaban deshidratación, microfracturas, descamación, disgregación y pulverulencia debido al proceso realizado en 1910. B) Esqueleto de Hidalgo al finalizar el tratamiento. C) Esqueleto de Allende al finalizar el tratamiento.

exhibieron con dignidad en una muestra conmemorativa en el Palacio Nacional para ser finalmente devueltos al mausoleo del Monumento a la Independencia.

Dada la historia de estos esqueletos, los huesos están deshidratados, agrietados, con fisuras y fracturas. La cortical presentaba craqueladuras y escamas. Además, se observó crecimiento fúngico en la superficie [Figura 5 A].

Se decidió utilizar únicamente quitosán<sup>[10]</sup>, ya que no presentaban problemas de desmineralización ni pérdida de dureza. Se utilizó por aspersión con un pulverizador para inhibir y erradicar hongos [Figura 6A]. La solución se aplicó hasta saturar los huesos. Después de 24 horas se llevó a cabo

la limpieza utilizando quitosán al 0,48 %<sup>[11]</sup>. Se colocaron los huesos en una bandeja de plástico sin cubrirlos por completo; la superficie se limpió con un cepillo de cerdas suaves sintéticas montado en un micromotor rotatorio utilizando dicha solución a manera de “detergente” [Figura 6B], y se realizó la bioconsolidación por absorción sumergiendo los huesos en la solución de quitosán hasta alcanzar la saturación [Figura 6C].

El tratamiento con quitosán eliminó la presencia de hongos haciendo segura su manipulación para el equipo de conservadores y otros profesionales que los estudiaron. Además, los huesos se rehidrataron y la apariencia escamosa disminuyó notablemente [Figura 5 B y C].



**Figura 6.-** A) En la imagen se muestra el proceso realizado para inhibir el crecimiento fúngico con quitosán aplicado por aspersión. B) Proceso de limpieza de la superficie de los huesos. C) Después de la limpieza se realizó la consolidación de los huesos por absorción

— *Huesos con desmineralización y disgregación*

-Defensa de mamut del Museo Regional de Nayarit, México.

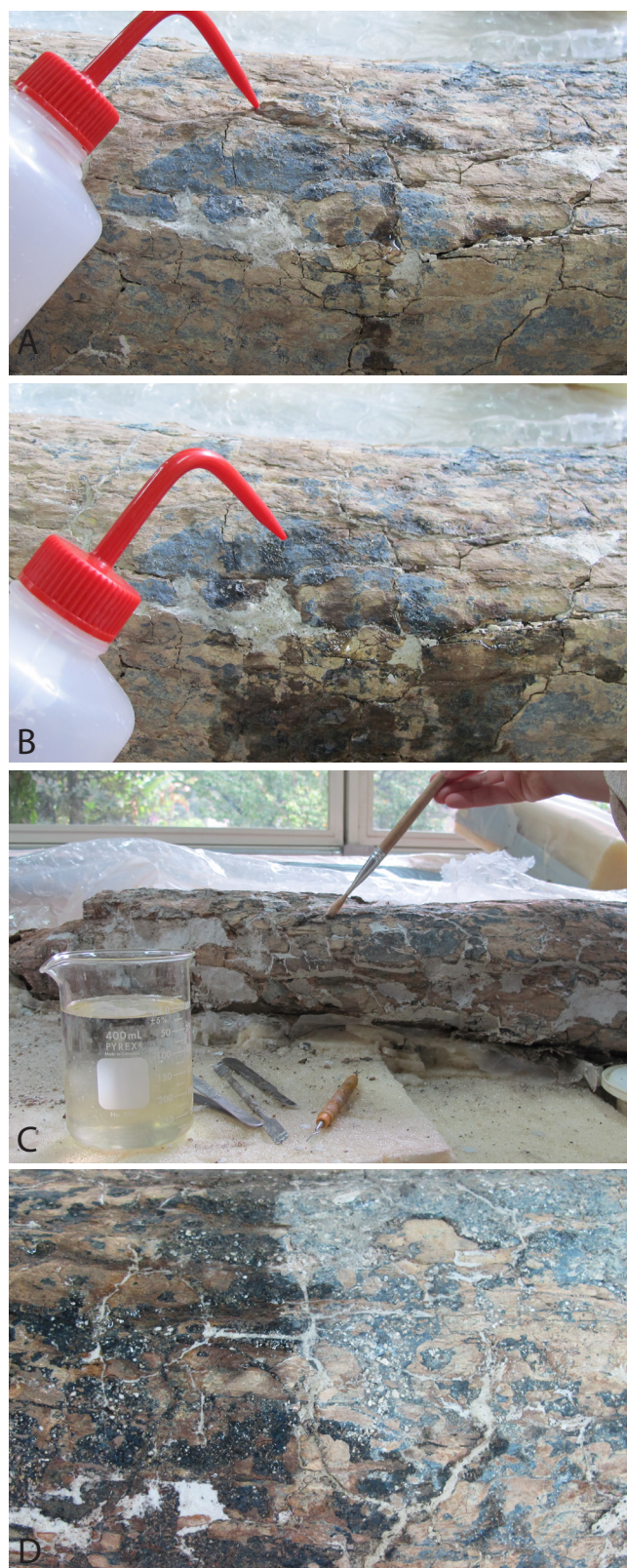
Esta defensa de mamut es una de los dos restos paleontológicos del Museo Regional de Nayarit, México, que cuenta con contexto de excavación. Fue encontrada en 1995 cerca del aeropuerto de Nayarit en terrenos con el manto freático muy alto. Para su extracción se adhirió a su superficie papel periódico con Resistol® 850 diluido en agua, se hizo una carcasa de yeso, y se extrajo. La pieza estuvo en el museo sin tratamiento hasta 1997, cuando se quitó parte de la cobertura de yeso y se realizó una limpieza con alcohol de 96° diluido al 30 % <sup>[12]</sup> en agua con hisopos de algodón y cepillo de cerda fina. Además, se aplicó alcohol isopropílico en dos ocasiones y se consolidó con Mowilith® 50 diluido en *thinner* (disolvente orgánico) al 30 % . Tras esta intervención, la defensa sufrió un deterioro considerable debido a que el tratamiento con el Mowilith® no fue el adecuado al quedarse en superficie [Figura 7A]. En 2019 se hicieron estudios histotafonómicos y geoquímicos, y se intervino para evitar su pérdida, ya que estaba completamente fragmentada y colapsada en algunas secciones y la dentina presentaba sequedad y extrema fragilidad al tacto debido a su desmineralización y pérdida de colágeno: cuando se ejercía una ligera presión sobre cada fragmento, se rompía o se pulverizaba.

Para solucionar la extrema fragilidad de la defensa y desecamiento, se intervino con fluoruro de sodio al 1 %



**Figura 7.-** A) Estado de conservación de la defensa antes del tratamiento de 2019. Se nota la capa de consolidante sintético envejecido en la superficie. B) Estado de la defensa al terminar su intervención.

aplicado con un matraz de lavado hasta saturar el hueso [Figura 8A y B]; una vez evaporada el agua de la solución de fluoruro de sodio, se aplicó quitosán con pincel plano de cerda dura, y quitosán de alto peso molecular <sup>[13]</sup> [Figura 8C y D].



**Figura 8.-** A y B) Fluoruro de sodio que se colocó con un matraz de lavado hasta saturar el hueso. C y D) Bioconsolidación con solución de quitosán aplicado con pincel de cerdas suaves hasta saturar la estructura de la dentina.

El tratamiento, permitió que cada fragmento de dentina recuperara su dureza y parte de su hidratación evitando su rotura en fragmentos más pequeños o su franca disgregación en polvo, facilitando la manipulación general del ejemplar y otros tratamientos de adhesión de fragmentos, relleno de grietas y montaje en un soporte traslúcido.

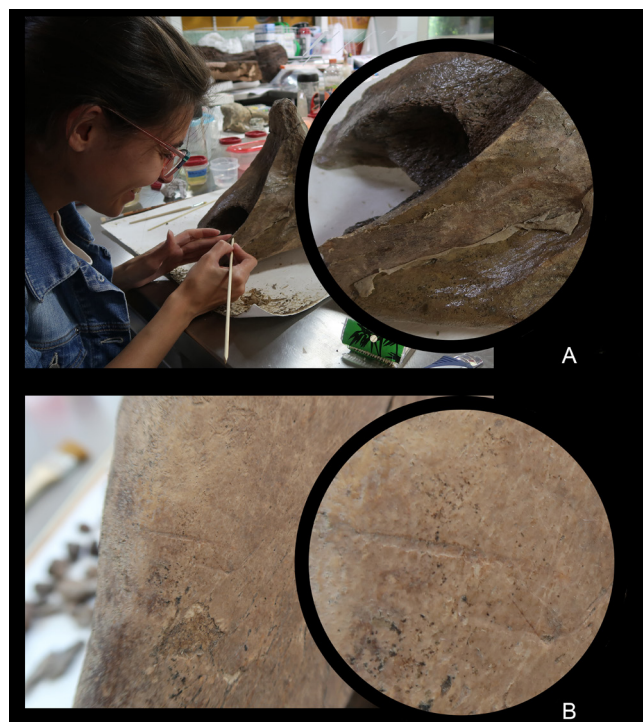
#### — Huesos tratados previamente con polímeros sintéticos

-Fósiles de mamut de Tocuila, Estado de México.

Estos restos fósiles fueron excavados y tratados en los 90 del siglo pasado. Durante el análisis de los más de 1000 huesos recuperados se observó que varios tenían marcas tafonómicas importantes como huellas de corte que identificaron a este sitio como un lugar donde los pobladores tempranos del centro de México obtenían material óseo para hacer herramientas. Estas piezas fueron consolidadas con Resistol® 850 diluido en agua. A partir de 2021, se realizaron estudios histotafonómicos y geoquímicos en algunas piezas relevantes del conjunto. Además, se iniciaron procesos de restauración debido a que el consolidante usado en la intervención previa generó capas superficiales de grosor considerable que junto a su envejecimiento, alteró las características organolépticas de la superficie ósea original [Figura 9A].

La capa de Resistol® 850 de la superficie del hueso compacto se eliminó con quitosán de alto peso molecular <sup>[14]</sup>, aplicado varias veces con pincel plano dejando secar entre ellas, hasta formar una capa gruesa; el quitosán se coloca en la superficie con el pincel pero no se arrastra el material sobre ella; esto ayuda a formar capas densas de producto. Después, esta capa se rehidrató con agua aplicada con pincel y se levantó con ayuda de un palillo de bambú con la punta modificada a modo de espátula [Figura 10 A].

El quitosán eliminó de manera eficiente la capa del polímero sintético antiguo sin tener que hacer fricción sobre la superficie. Esto resultó sumamente importante ya que bajo la vieja capa se encontraron marcas de corte [Figura 10B], y marcas de dientes de carnívoro que no se habían logrado distinguir en el análisis de los fósiles. Además, con la remoción



**Figura 10.-** A) Eliminación de la capa de quitosán con un palillo de bambú. En el detalle se observa la sección intervenida y cómo se retira la película. B) Marcas de corte que se hicieron patentes tras la limpieza. Se puede observar también que la textura, el brillo y el color del hueso se han recuperado. María Pérez Barea ©.

del polímero ahora se puede observar adecuadamente la textura, el color y el brillo del hueso fósil.

#### Conclusiones

El uso del quitosán y del fluoruro de sodio es versátil. Pueden aplicarse juntos o por separado, lo que deberá ser evaluado a partir del diagnóstico del estado de conservación del elemento óseo que deba ser intervenido. Las concentraciones de los productos también pueden variar, pero sugerimos que el flúor nunca se utilice en valores más altos del 1 %, puesto que el hueso puede volverse demasiado duro y, por ende, quebradizo.



**Figura 9.-** Epífisis de ulna de mamut de Tocuila A) Estado de conservación de la pieza antes de ser intervenida en 2021. Se observa una capa grisácea en la superficie del hueso formada por acetato de polivinilo envejecido. B) Proceso de limpieza. La mitad inferior ya ha sido tratada con quitosán para remover la capa de polímero sintético. C) Estado de conservación del hueso una vez eliminada toda la capa de polímero.

Además, estos productos presentan una serie de ventajas sobre los consolidantes tradicionales: a) Tratan directamente los problemas de desmineralización y pérdida de colágeno; b) Mantienen intacta la estructura del hueso sin formar capas superficiales ni rellenando espacios; c) No cambian las cualidades de textura, color y brillo del tejido óseo tratado; d) Funcionan como tratamientos profilácticos y de desinfección; d) Son productos no tóxicos y amigables con el medio ambiente; incluso son biocompatibles. La toxicidad del fluoruro de sodio se da con la ingesta excesiva del mismo, pero cuando es deficiente en el organismo, causa patologías. Por otro lado, es necesario entender que el proceso de remineralización es irreversible, ya que actúa directamente sobre la composición de los cristales de apatita, pero sin alterar la microestructura del hueso. Por ello, es necesario que su uso quede registrado y que se tomen muestras antes de iniciar el procedimiento, puesto que hay estudios tafonómicos en los que la cantidad de fluorapatita formada naturalmente es importante (Del Valle *et al.* 2025). A su vez, el quitosán es reversible, ya que se disuelve en agua; sin embargo, el proceso de consolidación en sí mismo no lo es, como sucede con los productos tradicionales ya mencionados en este estudio.

En el contexto actual de la crisis climática que vivimos, las acciones individuales son trascendentes. Por ello, es necesario recalcar la importancia de buscar y escoger soluciones amigables con el medio ambiente que reduzcan nuestra huella de carbono, que sean biodegradables, y que se pondere la pertinencia de usar productos más nocivos. El uso del quitosán y fluoruro de sodio es una alternativa sostenible y responsable con la salud individual, comunitaria y del planeta. Por último, cabe mencionar que nuestra experiencia muestra que, bien utilizados, estos productos son eficaces para la conservación del hueso; sin embargo, aún hacen falta más valoraciones empíricas que arrojen datos cuantitativos y cualitativos<sup>[15]</sup> de los efectos de las intervenciones con estos materiales.

## Agradecimientos

Las autoras desean expresar su sincero agradecimiento a los revisores y al equipo editorial por sus valiosos comentarios y sugerencias. Sus observaciones contribuyeron significativamente a mejorar la claridad, el rigor y la calidad general del manuscrito.

## Notas

[1] Entrecomillado porque aunque la sustancia puede ser reversible el método no lo es. Además, los polímeros sintéticos suelen tener reacciones de entrecruzamiento debido a factores como la temperatura de transición vítrea, la oxidación o la exposición a la radiación UV, que generan que el polímero sea cada vez más insoluble.

[2] La permineralización es un proceso en el que se depositan minerales ajenos al hueso naturalmente en los espacios óseos y que

es común, aunque no esencial, en la fosilización del hueso.

[3] Procedimiento para hacer el remineralizador (NaF) al 1%: Colocar en un vaso de precipitado 1 litro de agua destilada sobre la balanza. Agregar 10 g de fluoruro de sodio. Agitar para favorecer su disolución. Dejar reposar hasta que todo esté completamente disuelto. Verter la solución en un contenedor previamente etiquetado (fecha, sustancia, concentración). Esta disolución puede durar más de un año si se almacena tapado, en un lugar fresco y sin luz directa, y sin meter ninguna herramienta al contenedor para no contaminar. Se puede desechar por el desagüe después de usarse. Cabe recordar que para la preparación y uso del fluoruro de sodio no pueden usarse herramientas de metal o vidrio, ya que el flúor reacciona con los iones metálicos de ambos materiales consumiéndose y la solución dejaría de ser efectiva.

[4] Que giran a la izquierda

[5] Que giran a la derecha

[6] Procedimiento para preparar bioconsolidante (quitosán) (al 1,94 %): Verter 800 ml de agua destilada en la licuadora. Agregar el quitosán y bajar las revoluciones durante 2 minutos. Pesar 6 g de ácido acético y agregarlos a los 200 ml de agua en un vaso de precipitado. Verter la solución en la licuadora, rápida pero cuidadosamente, y aumentar la velocidad. Al notar un cambio de sonido, apagar. Verter la mezcla en un frasco de vidrio ámbar con tapa y etiquetar (fecha, sustancia, concentración). Dejar reposar 24 horas antes de usar. Si se usa por inmersión, la solución restante no se puede reusar.

[7] Los puentes de hidrógeno son un tipo especial de enlace dipolo-dipolo que se forman entre un átomo de hidrógeno con carga parcial positiva y un átomo electronegativo (como oxígeno, nitrógeno o flúor) con carga parcial negativa en otra molécula o dentro de la misma.

[8] Son las fuerzas atractivas o repulsivas entre las moléculas. Son más débiles que los enlaces iónicos y los covalentes, pero responsables de fenómenos físicos y químicos como la adhesión, rozamiento, difusión, tensión superficial y la viscosidad. Se conocen como fuerzas dipolo-dipolo, dipolo-dipolo inducido y fuerzas de London.

[9] El quitosán que se obtiene tras el procedimiento en la nota al pie 7, se diluyó 1:1 en agua destilada.

[10] El quitosán que se obtiene tras realizar el procedimiento en la nota al pie 7, se diluyó 1:1 en agua destilada.

[11] La solución que se obtiene tras realizar el procedimiento en la nota al pie 7, se diluyó 2:1 (agua destilada:quitosán).

[12] Esta es la única información que se conserva en el informe.

[13] El quitosán que se obtiene tras el procedimiento en la nota al pie 7, se diluyó 1:1 en agua destilada.

[14] Se utilizó la concentración del procedimiento de la nota al pie 7.

[15] La segunda autora ha comenzado a realizar estas pruebas como parte de una tesis de doctorado en la Universitat Rovira i Virgili y el Institut Català de Paleoecologia Humana y Evolució Social.

## Referencias

- ABDEL-MAKSOUND, G., KIRA, H.E.S. AND MOHAMED, W.S. (2022). "Consolidation of Fragile Archaeological Bone Artifacts: A review", *Egyptian Journal of Chemistry*, 65(13): 1065–1080. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2022.158706.6860>.
- ARANAZ, I., ALCÁNTARA, A.R., CIVERA, M. C., ARIAS, C., ELORZA, B., CABALLERO, A.H., ACOSTA, N. (2021). "Chitosan: An overview of its properties and applications", *Polymers*, 13. <https://doi.org/10.3390/polym13193256>.
- BECERRA, J., RODRIGUEZ, M., LEAL, D., NORIS-SUAREZ, K., GONZALEZ, G. (2022) "Chitosan-collagen-hydroxyapatite membranes for tissue engineering", *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 33(2). <https://doi.org/10.1007/s10856-022-06643-w>.
- BERKOVITZ, B. AND SHELLIS, P. (2018). *The teeth of mammalian vertebrates*. Amsterdam, New York: Academic Press.
- BROCK, F. DEE, M., HUGHES, A., SNOECK, C., STAFF, R., BRONK RAMSEY, C. (2018). "Testing the effectiveness of protocols for removal of common conservation treatments for radiocarbon dating", *Radiocarbon*, 60(1): 35–50. <https://doi.org/10.1017/RDC.2017.68>.
- CIMINO, D.; CHIANTORE, O., POLI, T., ORMEZZANO, D., GALLO, L. M. (2014). "Historical conservation treatments in palaeontology: the geo-palaeontological collection of the Geology and Palaeontology Museum of the University of Turin managed by the Piedmont Council Museum of Natural Science of Turin", *Museologia Scientifica*, 8:71–76.
- COLLINS, M.J.; RILEY, M., CHILD, A. M., TURNER-WALKER, G. (1995). "A Basic Mathematical Simulation of the Chemical Degradation of Ancient Collagen", *Journal of Archaeological Science*, 22: 175–183. <https://doi.org/10.1006/jasc.1995.0019>.
- CROISIER, F. AND JÉRÔME, C. (2013). "Chitosan-based biomaterials for tissue engineering", *European Polymer Journal*, 49(4): 780–792. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2012.12.009>.
- DEL VALLE, H., RODRÍGUEZ-NAVARRO, A., MOCLÁN, A., GARCÍA-MEDRANO, P., CÁCERES, I. (2025) "Bone diagenesis and stratigraphic implications from Pleistocene karst systems", *Scientific Reports*, 15(1), pp. 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88968-4>.
- DÍAZ-CORTÉS, A., GRAZIANI, G., BOI, M., LÓPEZ-POLÍN, L., SASSONI, E. (2022). "Conservation of Archaeological Bones: Assessment of Innovative Phosphate Consolidants in Comparison with Paraloid B72", *Nanomaterials*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/nano12183163>.
- DUTTA, P.K., DUTA, J. AND TRIPATHI, V.S. (2004). "Chitin and Chitosan: Chemistry, properties and applications", *Journal of Scientific and Industrial Research*, 63(1): 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001>.
- ELLIOTT, J.C. (2002). "Calcium Phosphate Biominerals". En: *Phosphates: Geochemical, Geobiological and materials importance*. Kohn, M., Rakovan, J., Hughes, J.M. (eds). Washington, D.C: The Mineralogical Society of America., 427–448.
- ESCOBAR SIERRA, D.M., MESA OSPINA, D.N. (2019). "Evaluación de recubrimientos de quitosano sobre cuerpos porosos de hidroxiapatita", *Scientia et Technica*, 24(1): 161–172. <https://doi.org/10.22517/23447214.20051>.
- VON EUW, S. WANG, Y., LAURENT, G., DROUET, C., BABONNEAU, F., NASSIF, N., AZAÏS, T. (2019). "Bone mineral: new insights into its chemical composition", *Scientific Reports*, 9(1): 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44620-6>.
- EZODDINI-ARDAKANI, F. NAVABAZAM, A., FATEHI, F., DANESH-ARDEKANI, M., KHADEM, S., ROUHI, G. (2012). "Histologic evaluation of chitosan as an accelerator of bone regeneration in microdrilled rat tibias", *Dental research journal*, 9(6): 694–9. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23559943/>.
- Ficha técnica del NAF utilizado: [https://www.sigmaaldrich.com/specification-sheets/137/240/201154-BULK\\_\\_\\_\\_SIGALD\\_\\_\\_\\_.pdf](https://www.sigmaaldrich.com/specification-sheets/137/240/201154-BULK____SIGALD____.pdf)
- (Ficha técnica de las marcas de quitosán utilizados: [https://www.sigmaaldrich.com/specification-sheets/392/945/419419-BULK\\_\\_\\_\\_ALDRICH\\_\\_\\_\\_.pdf](https://www.sigmaaldrich.com/specification-sheets/392/945/419419-BULK____ALDRICH____.pdf); <https://www.scbt.com/es/p/chitosan-9012-76-4?srltid=AfmBOoxrr1YBiZMsY4AE-q-9tSc2maXdHKS27UitMCXguEQy4YlzG1w>)
- GEORGIADIS, M., MÜLLER, R. AND SCHNEIDER, P. (2016). "Techniques to assess bone ultrastructure organization: Orientation and arrangement of mineralized collagen fibrils", *Journal of the Royal Society Interface*, 13(119): 1–26. <https://doi.org/10.1098/rsif.2016.0088>.
- GIRALDO, J. (2015). "Propiedades, obtención, caracterización y aplicaciones del quitosano", University of Concepcion [Preprint]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3350.9287>.
- GIRAUD-GUILLE, M.M. (1988). "Twisted plywood architecture of collagen fibrils in human compact bone osteons", *Calcified Tissue International*, 42(3): 167–180. <https://doi.org/10.1007/BF02556330>.
- GIRAUD-GUILLE, M.M., BELAMIE, E. AND MOSSER, G. (2004). "Organic and mineral networks in carapaces, bones and biomimetic materials", *Comptes Rendus - Palevol*, 3(6-7): 503–513. <https://doi.org/10.1016/j.crpv.2004.07.004>.
- HEDGES, R.E.M. (2002). "Bone diagenesis: an overview of Processes", *Archaeometry*, 44(3): 319–328.

- HOWIE, F.M.P. (1984). "Materials used for conserving fossil specimens since 1930: A review", *Studies in Conservation*, 29 (sup1): 92–97. <https://doi.org/10.1179/sic.1984.29.Supplement-1.92>.
- HUGHES, J.M. AND RAKOVAN, J. (2002). "The crystal structure of apatite,  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{OH},\text{Cl})$ ". En: *Phosphates: Geochemical, Geobiological and materials importance*. Kohn, M., Rakovan, J., Hughes, J.M. (eds). Washington, D.C: The Mineralogical Society of America, 1-11.
- JHA, S.K. ET AL. (2011). "Fluoride in the environment and its metabolism in humans", *Acta Medica Academica*, 211: 121–142. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8011-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8011-3_4).
- JOHNSTON, N.R. AND STROBEL, S.A. (2020). "Principles of fluoride toxicity and the cellular response: a review", *Archives of Toxicology*, 94(4): 1051–1069. <https://doi.org/10.1007/s00204-020-02687-5>.
- KEENAN, S.W. (2016). "From bone to fossil: A review of the diagenesis of bioapatite", *American Mineralogist*, 101(9): 1943–1951. <https://doi.org/10.2138/am-2016-5737>.
- KENDALL, C., HØIER ERIKSEN, A. M., KONTOPOULOS, I., COLLINS, M. J., TURNER-WALKER, G. (2018). "Diagenesis of archaeological bone and tooth", *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 491: 21–37. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.11.041>.
- KOHN, M.J., RAKOVAN, J. AND HUGHES, J.M. (2002). *Phosphates: Geochemical, geobiological, and materials importance*, Reviews in Mineralogy and Geochemistry. Washing: Mineralogical Society of America.
- KOOB, S.P. (1984). "The consolidation of archaeological bone", *Studies in Conservation*, 29: 98–102. <https://doi.org/10.1179/sic.1984.29.Supplement-1.98>.
- LIU, Y. HU, Q., ZHANG, K., YANG, F., YANG, L., WANG, L. (2021) "In-situ growth of calcium sulfate dihydrate as a consolidating material for the archaeological bones", *Materials Letters*, 282. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128713>.
- LÓPEZ-GONZÁLEZ, S., VALDEZ-VARGAS, B. J., LARA-CARILLO, E., KUBODERA-ITO, T., MEDINA-SOLÍS, C. E. (2018) "Desmineralización y remineralización dental: una revisión de la literatura". En C.E. Medina Solís et al. (eds.) *Temas actuales en Odontología*. San Francisco de Campeche: Universida Autónoma de Campeche, pp. 54–75. Disponible en: <https://doi.org/10.4067/s1726-569x2011000200001>.
- LÓPEZ-POLÍN, L. (2012). "Possible interferences of some conservation treatments with subsequent studies on fossil bones: A conservator's overview", *Quaternary International*, 275: 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.07.039>.
- MARÍN-ORTEGA, S., IGLESIAS-CAMPOS, M.A., CALVO I TORRAS, M.A. (2024). "Evaluation of carbonated fossil bone consolidation by induction of calcium hydroxide nanoparticles in a Miocene *Cheirogaster richardi* specimen", *Journal of Cultural Heritage*, 70: 19–30. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.08.006>.
- MATICA, A., MENGHIU, G. AND OSTAFE, V. (2017). "Biodegradability of Chitosan Based products", *New Frontiers in Chemistry*, 26(1): 75–86.
- MERINO, L. Y MORALES, J. (2008). "Relación del índice de cristalinidad (IC) con la edad y el contenido de iones F y CO<sub>3</sub> en muestras de vertebrados fósiles", *Estudios Geologicos*, 64(1): 75–87.
- MOREIRAS REYNAGA, D.K., MUNIZZI, J. S., MCMILLAN, RHY., MILLAIRE, J. F., LONGSTAFFE, F. J. (2023). "Effects of consolidants and their removal by polar solvents on the stable isotope compositions of bone", *Quaternary International*, 660: 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2022.12.004>.
- NEWESELY, H. (1989). "Fossil bone apatite", *Applied Geochemistry*, 4(3): 233–245. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(89\)90023-1](https://doi.org/10.1016/0883-2927(89)90023-1).
- NORTH, A., BALONIS, M. AND KAKOULLI, I. (2016). "Biomimetic hydroxyapatite as a new consolidating agent for archaeological bone", *Studies in Conservation*, 61(3): 146–161. <https://doi.org/10.1179/2047058415Y.0000000020>.
- PAZ LÓPEZ, C.V. (2013). *Análisis Teórico-Práctico en la interfase Quitosano/Hueso mediante monolitos compactos y porosos*. Michoacán: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- PAZ LÓPEZ, C.V., VASQUEZ-GARCIA, S.R. Y FLORES-RAMÍREZ, N. (2016). "Interfacial analysis of chitosan/bone: cortical and cancellous bone matrices", *Superficies y Vacío*, 29(3): 70–73.
- PERSON, A., BOCHERENS, H., SALIÈGE, J. F., PARIS, F., ZEITOUN, V., GÉRARD, M. (1995). "Early Diagenetic Evolution of Bone Phosphate: An X-ray Diffractometry Analysis", *Journal of Archaeological Science*, 22(2): 211–221. <https://doi.org/10.1006/jasc.1995.0023>.
- PORPORA, F. ZARO, V., LICCIOLI, L., MODI, A., MEOLI, A., MARRADI, G., BARONE, S., VAI, S., DEI, L., CARAMELLI, D., FEDI, M., LARI, M., CARRETTI, E. (2022). "Performance of innovative nanomaterials for bone remains consolidation and effect on <sup>14</sup>C dating and on palaeogenetic analysis", *Scientific Reports*, 12: 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10798-5>.
- PUCHE, R. Y RIGALLI, A. (2007). "Metabolismo Del Flúor En Adultos", *Actualizaciones en Osteología*, 3(1): 10–12.
- RASHED, A.A., MISNAN, N.M. Y NAWI, M.N.M. (2023). "Chitosan-based formulation for bone health: A review", *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100359>.
- RINAUDO, M. (2006). "Chitin and chitosan: Properties and applications", *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 31(7): 603–632. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001>.
- ROŠIN-GRGET, K., PEROŠ, K., SUTEJ, I., BAŠIĆ, K. (2013). "The cariostatic mechanisms of fluoride", *Acta medica academica*, 42(2): 179–188. <https://doi.org/10.5644/ama2006-124.85>.
- SANSHU, L. Y BREAKER, R.R. (2012). "Fluoride Enhances the Activity of Fungicides that Destabilize Cell Membranes Sanshu", *Bioorg.*

*Med. Chem. Lett.*, 22(9): 3317–3322. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2012.03.006>. **Fluoride**.

SIONKOWSKA, A. (2006). "Effects of solar radiation on collagen and chitosan films", *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 82(1): 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2005.08.003>.

SIVAPRIYA, E. SRIDEVI, K., PERIASAMY, R., LAKSHMINARAYANAN, L., PRADEEPKUMAR, A. R. (2017). "Remineralization ability of sodium fluoride on the microhardness of enamel, dentin, and dentinoenamel junction: An in vitro study", *Journal of conservative dentistry: JCD*, 20(2): 100–104. [https://doi.org/10.4103/JCD.JCD\\_353\\_16](https://doi.org/10.4103/JCD.JCD_353_16).

THOMAS, G. Y REEVES, P. (1997). "La Fluoración del agua. Un Manual Para Operadores de Planta de Agua". Washington D.C: Panamerican Health Organization. <https://iris.paho.org/handle/10665.2/35857>

VENKATESAN, J., VINODHINI, P. A., SUDHA, P.N., KIM, S.K. (2014). Chitin and chitosan composites for bone tissue regeneration. En: *Advances in Food and Nutrition Research*. 1st edn. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800268-1.00005-6>.

VENKATESAN, J. Y KIM, S.K. (2010). "Chitosan composites for bone tissue engineering - An overview", *Marine Drugs*, 8(8): 2252–2266. <https://doi.org/10.3390/md8082252>.

WOPENKA, B. AND PASTERIS, J.D. (2005). "A mineralogical perspective on the apatite in bone", *Materials Science and Engineering C*, 25(2): 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2005.01.008>.

## Autor/es



**Luisa Straulino Mainou**

[lstraolino@iphes.cat](mailto:lstraolino@iphes.cat)

Institut Català de Paleoecologia Humana y Evolució Social

<https://orcid.org/0000-0003-3526-2783>

Trabaja en la Coordinación Nacional de Conservación del Patrimonio Cultural del Instituto Nacional de Antropología e Historia, México. Es restauradora-conservadora de patrimonio cultural por la Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía, es maestra en Estudios Mesoamericanos por la UNAM y actualmente realiza un doctorado en Cuaternario y Prehistoria en la Universidad Rovira y Virgili y el Institut Català de Paleoecologia Humana y Evolució Social. Su trabajo se ha centrado en la conservación de patrimonio arqueológico y paleontológico; de este último particularmente de vertebrados y más específicamente de fauna del Pleistoceno. Ha colaborado en proyectos internacionales, por ejemplo, en un proyecto de la Universidad de Tarapacá, Chile para la conservación e investigación de un megaterio encontrado en el Desierto de Atacama. Su labor de investigación se ha enfocado en el diagnóstico integral del patrimonio arqueológico y paleontológico utilizando diversas técnicas analíticas como la petrografía, la microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos x e infrarrojo por transformada de Fourier. En el análisis de elementos óseos ha incorporado la histotafonomía como una herramienta indispensable de diagnóstico.

Tiene diversas publicaciones tanto académicas como de divulgación y ha organizado y participado en diversos congresos nacionales e internacionales. Ganó mención honorífica en los premios INAH con su tesis de licenciatura en el premio "Paul Coremans" por su tesis: *Fluoruro de sodio: ¿Una alternativa para la conservación de piedra caliza disgregada a través de la remineralización? El caso de la cornisa del edificio 5N2 del Grupo A en Río Bec, Campeche* y por su tesis de maestría en la categoría "Alfonso Caso" por su tesis: *Hacer mezclas de cal en Dzibanché durante el Clásico temprano: la temporalidad y la función arquitectónica como determinantes*.



**Luisa Mainou Cervantes**

[gatomainou@hotmail.com](mailto:gatomainou@hotmail.com)

Coordinación Nacional de Conservación del Patrimonio Cultural-INAH

<https://orcid.org/0000-0003-2855-020X>

Trabaja en la Coordinación Nacional de Conservación del Patrimonio Cultural del Instituto Nacional de Antropología e Historia, México desde hace 30 años. Es restauradora-conservadora de patrimonio cultural por la Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía y es maestra en Museología por la misma institución. Su labor se centra sobre todo en los materiales de origen orgánico o mixto. Realiza investigación y elaboración de métodos y procesos de conservación compatibles con la naturaleza de los bienes culturales orgánicos, que sean retratables, biodegradables, amigables con el medio ambiente y que no perjudiquen la salud de quien manipula los objetos. Es reconocida por su labor en la conservación de hueso y ha sido designada para la conservación de elementos óseos de importancia histórica para México como lo son las osamentas de los Héroes de la Independencia, las de los Hermanos Serdán y la de Sor Juana Inés de la Cruz y de diversas osamentas de individuos prehispánicos así como de contexto forense. Además, colabora con la Universidad Autónoma de Yucatán en la conservación directa e indirecta de la colección osteológica de referencia de Xoclán y ha participado en proyectos internacionales conservando osamentas mayas en Guatemala. Otra rama de su labor como restauradora es la investigación de los procesos de deterioro y degradación del patrimonio cultural por medio de la microscopía electrónica de barrido. Ganó el premio INAH de licenciatura "Paul Coremans" por su tesis: *La detección de las palomas Columbi livia como factor bioalterante de las fachadas de la Santa Veracruz y San Juan de Dios, Ciudad de México*.

Artículo enviado 01/04/2025  
Artículo aceptado el 06/08/2025



<https://doi.org/10.37558/gec.v26i1.1377>