

Caracterización microestructural y evaluación de la actividad antimicrobiana de nanopartículas de plata incorporadas en un cemento peruano de silicato de calcio

Microstructural characterization and evaluation of the antimicrobial activity of silver nanoparticles incorporated into a Peruvian calcium silicate cement

Caracterização microestrutural e avaliação da atividade antimicrobiana de nanopartículas de prata incorporadas em um cimento peruano de silicato de cálcio

Recibido: 28/01/2026 | Revisado: 10/03/2026 | Aceptado: 11/03/2026 | Publicado: 13/03/2026

Maria del Pilar Kozonasky

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6706-5194>
New York University - School of Dentistry, United States
E-mail: mapi_tavara@hotmail.com

Giovana Sofia Schroeder

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9784-6367>
Independent Researcher, United States
E-mail: sofiamav87@gmail.com

Ninoska J. Barrios

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8977-5217>
Independent Researcher, United States
E-mail: barriosnino@hotmail.com

Lina M. Rivera

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3672-2986>
Independent Researcher, United States
E-mail: linita_2395@hotmail.com

Karla L. Reynoso

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0434-439X>
Independent Researcher, United States
E-mail: karlitareynoso18@gmail.com

Jocelyn L. Palafox

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1334-4776>
Independent Researcher, United States
E-mail: j.palafox1324@gmail.com

Claudia A. Arias

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7865-3798>
Independent Researcher, United States
E-mail: claudia.am1076@gmail.com

Maria Antonella Restani

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0271-6883>
Independent Researcher, United States
E-mail: restaniantonella@gmail.com

William A. Ramirez Mesias

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9854-1010>
Universidad de San Martín de Porres, Perú
E-mail: wiliamramirez15@gmail.com

Resumen

Objetivo: Evaluar la composición de las fases cristalinas y la actividad antimicrobiana de un cemento Portland blanco modificado con nanopartículas de plata (WPC + NPs-Ag), en comparación con el Agregado de Trióxido Mineral Blanco (WMTA) y Biodentine®. **Métodos:** Se realizó un estudio experimental in vitro. La caracterización de las fases cristalinas se llevó a cabo mediante difracción de rayos X (DRX), con cuantificación por el método de refinamiento de Rietveld. La actividad antimicrobiana se evaluó mediante la técnica de difusión en agar frente a *Enterococcus faecalis* ATCC 29212 y *Candida albicans* ATCC 90028, a las 24 y 48 horas de incubación a 37 °C. El análisis estadístico se realizó mediante ANOVA unidireccional, seguido de la prueba post hoc de Bonferroni ($p < 0,05$). **Resultados:** El WPC + NPs-Ag presentó una composición cristalina similar a la observada en WMTA y Biodentine®, con predominio de fases de silicato de calcio y presencia de plata metálica, sin alteraciones relevantes en la matriz cementicia. Desde el punto de vista microbiológico, el material experimental mostró zonas de inhibición

significativamente mayores frente a *E. faecalis* y *C. albicans* en comparación con WMTA y Biodentine® ($p < 0,05$). Conclusión: La incorporación de nanopartículas de plata al cemento Portland blanco potencia su actividad antimicrobiana sin modificar de manera relevante su estructura cristalina, lo que sugiere su potencial como material experimental alternativo para aplicaciones endodónticas. No obstante, se requieren estudios adicionales para confirmar su biocompatibilidad y desempeño clínico.

Palabras clave: Cemento de silicato de calcio; Nanopartículas de plata; Actividad antimicrobiana; *Enterococcus faecalis*; *Candida albicans*.

Abstract

Objective: To evaluate the crystalline phase composition and antimicrobial activity of white Portland cement modified with silver nanoparticles (WPC + NPs-Ag) compared with White Mineral Trioxide Aggregate (WMTA) and Biodentine®. **Methods:** An in vitro experimental study was conducted. Crystalline phase characterization was performed using X-ray diffraction (XRD), with quantification through the Rietveld refinement method. Antimicrobial activity was evaluated using the agar diffusion technique against *Enterococcus faecalis* ATCC 29212 and *Candida albicans* ATCC 90028 after 24 and 48 hours of incubation at 37 °C. Statistical analysis was performed using one-way ANOVA followed by Bonferroni post hoc test ($p < 0.05$). **Results:** WPC + NPs-Ag showed a crystalline composition similar to that observed in WMTA and Biodentine®, with predominance of calcium silicate phases and the presence of metallic silver, without relevant alterations in the cementitious matrix. From a microbiological perspective, the experimental material exhibited significantly larger inhibition zones against *E. faecalis* and *C. albicans* compared with WMTA and Biodentine® ($p < 0.05$). **Conclusion:** The incorporation of silver nanoparticles into white Portland cement enhances its antimicrobial activity without significantly modifying its crystalline structure, suggesting its potential as an alternative experimental material for endodontic applications. However, further studies are required to confirm its biocompatibility and clinical performance.

Keywords: Calcium silicate; Silver nanoparticles; Antimicrobial agents; *Enterococcus faecalis*; *Candida albicans*.

Resumo

Objetivo: Avaliar a composição das fases cristalinas e a atividade antimicrobiana de um cimento Portland branco modificado com nanopartículas de prata (WPC + NPs-Ag), em comparação com o Agregado de Trióxido Mineral Branco (WMTA) e o Biodentine®. **Métodos:** Foi realizado um estudo experimental in vitro. A caracterização das fases cristalinas foi realizada por difração de raios X (DRX), com quantificação pelo método de refinamento de Rietveld. A atividade antimicrobiana foi avaliada pela técnica de difusão em ágar frente a *Enterococcus faecalis* ATCC 29212 e *Candida albicans* ATCC 90028, após 24 e 48 horas de incubação a 37 °C. A análise estatística foi realizada por meio de ANOVA unidirecional, seguida do teste post hoc de Bonferroni ($p < 0,05$). **Resultados:** O WPC + NPs-Ag apresentou composição cristalina semelhante à observada no WMTA e no Biodentine®, com predomínio de fases de silicato de cálcio e presença de prata metálica, sem alterações relevantes na matriz cimentícia. Do ponto de vista microbiológico, o material experimental apresentou zonas de inibição significativamente maiores frente a *E. faecalis* e *C. albicans* quando comparado ao WMTA e ao Biodentine® ($p < 0,05$). **Conclusão:** A incorporação de nanopartículas de prata ao cimento Portland branco potencializa sua atividade antimicrobiana sem modificar significativamente sua estrutura cristalina, sugerindo seu potencial como material experimental alternativo para aplicações endodônticas. No entanto, são necessários estudos adicionais para confirmar sua biocompatibilidade e desempenho clínico.

Palavras-chave: Silicatos de cálcio; Nanopartículas de prata; Agentes antimicrobianos; *Enterococcus faecalis*; *Candida albicans*.

1. Introducción

Los cementos dentales compuestos de silicato de calcio (CCSC) constituyen una clase en los cementos hidráulicos bioactivos ampliamente utilizados en endodoncia, caracterizados por su capacidad de fraguar en presencia de humedad y por una composición predominantemente basada en silicatos tricálcicos (C_3S) y dicálcicos (C_2S). Estas fases cristalinas son responsables de la hidratación del material y de la liberación de iones calcio, procesos estrechamente relacionados con su biocompatibilidad, capacidad de sellado y potencial bioactivo. Debido a estas propiedades fisicoquímicas favorables, dichos cementos se emplean de manera rutinaria en procedimientos clínicos orientados a la regeneración del complejo pulpar y la recuperación de tejidos duros del diente, a través de intervenciones como el recubrimiento pulpar directo o indirecto, pulpotomía, apexogénesis, apexificación, manejo de perforaciones y sellado retrógrado del ápice radicular (Torabinejad, 1993; Camilleri, 2008; Prati & Gandolfi, 2015; Dawood et al., 2017).

Diversos estudios han demostrado que el Agregado de Trióxido Mineral (MTA®) y otros cementos derivados del cemento Portland presentan composiciones cristalinas y comportamientos físico-químicos comparables, lo que ha impulsado el desarrollo de formulaciones alternativas con potencial aplicación clínica en endodoncia. En este sentido, investigaciones microestructurales han evidenciado que variaciones en la composición de fases, el tamaño de cristalito y la presencia de agentes radiopacificantes pueden influir en las propiedades físicas y biológicas del material, sin alterar de manera sustancial la matriz principal de silicato de calcio (Islam et al., 2006; Camilleri & Gandolfi, 2010; Kim et al., 2008; Vega-González et al., 2024; Raman & Camilleri, 2024).

No obstante, apesar de sus ventajas clínicas, varios autores han señalado limitaciones asociadas a los CCSC disponibles comercialmente, entre las que destacan su elevado costo y una actividad antimicrobiana intrínseca limitada. Esta limitación resulta clínicamente relevante debido a la persistencia de microorganismos resistentes, como *Enterococcus faecalis* y *Candida albicans*, frecuentemente asociados a fracasos endodónticos recurrentes y a infecciones persistentes del sistema de conductos radiculares (Asgary et al., 2009; Bidar et al., 2010; Jonaidi-Jafari et al., 2007; Torabinejad et al., 2013; Ravindran & Jeevanandan, 2023). Estudios previos han demostrado que tanto el cemento Portland como el MTA presentan una eficacia antimicrobiana variable frente a estos patógenos cuando se emplean sin modificaciones adicionales (Quea Cahuana et al., 2022; Jang et al., 2015).

Con el fin de superar estas limitaciones, múltiples investigaciones han explorado la modificación en los CCSC mediante la incorporación de compuestos funcionales, nanopartículas y agentes bioactivos, con el objetivo de potenciar su actividad antimicrobiana sin comprometer su biocompatibilidad ni su desempeño clínico. Estudios recientes han demostrado que la microestructura, el tamaño de partícula y la composición química influyen de manera directa en las propiedades mecánicas, bioactivas y antimicrobianas de estos materiales (Chang et al., 2014; Formosa et al., 2013; Ahmad et al., 2023; Pushpan et al., 2023).

En este contexto, las nanopartículas de plata (NPs-Ag) han despertado la atención creciente en el ámbito de la nanomedicina y los biomateriales dentales por su reconocida actividad antimicrobiana, así como a su eficacia frente a microorganismos resistentes a terapias convencionales. La elevada relación superficie-volumen de estas nanopartículas favorece la liberación de iones de plata (Ag^+), que pueden interactuar de manera directa con las membranas celulares microbianas, generando alteraciones en la permeabilidad celular, inhibición de la replicación del ADN y desnaturalización de proteínas esenciales para la supervivencia microbiana (Martínez-Castañón et al., 2008; Zhang et al., 2009; Koruyucu et al., 2015; Dong et al., 2019). Asimismo, estudios previos han demostrado que la integración de nanopartículas de plata en cementos de silicato de calcio puede mejorar significativamente su eficacia antimicrobiana, manteniendo propiedades fisicoquímicas aceptables (Samiei et al., 2013; Eskandarinezhad et al., 2017; Villavicencio et al., 2022).

Adicionalmente, investigaciones recientes han explorado la funcionalización de cementos de silicato de calcio mediante la incorporación de nanopartículas bioactivas, colágeno o compuestos antimicrobianos específicos, evidenciando mejoras en la bioactividad y en la respuesta antimicrobiana del material, lo que refuerza la tendencia actual hacia el desarrollo de biomateriales endodónticos avanzados (Shin et al., 2021; Castro-Núñez et al., 2024; Simila et al., 2024).

El objetivo del presente estudio fue evaluar la composición de las fases cristalinas y la actividad antimicrobiana de un cemento Portland blanco modificado con nanopartículas de plata (WPC + NPs-Ag), comparado con el Agregado de Trióxido Mineral Blanco (WMTA) y Biodentine® (BC).

2. Materiales y Métodos

Se implementó un diseño experimental in vitro, comparativo, con diseño completamente aleatorizado y enfoque cuantitativo (Pereira et al., 2018), empleando estadística descriptiva con medidas de tendencia central, desviación estándar y

frecuencias absolutas y relativas (Shitsuka et al., 2014), orientado a evaluar (i) la composición de fases cristalinas y (ii) la actividad antimicrobiana de un cemento Portland blanco modificado con nanopartículas de plata, comparado al WMTA y Biodentine®.

Materiales evaluados y preparación de muestras

Se evaluaron cuatro grupos: WPC, WPC + NPs-Ag, WMTA y BC. La elección de WMTA y BC como comparadores se fundamenta en su uso extendido como cementos hidráulicos basados en silicato de calcio, así como en reportes que describen su composición y desempeño fisicoquímico (Camilleri, 2008; Dawood et al., 2017; Ravindran & Jeevanandan, 2023).

Para el material experimental, las NPs-Ag se incorporaron al polvo de WPC en una proporción de 99 % WPC y 1 % NPs-Ag (p/p). Esta concentración se seleccionó con base en estudios que reportan mejora antimicrobiana de cementos hidráulicos sin afectar de forma crítica sus propiedades físico-químicas o de sellado, así como en evidencia comparativa de cementos Portland micro/nanoparticulados y MTA (Samiei et al., 2013; Eskandarinezhad et al., 2017; Villavicencio et al., 2022).

Las relaciones polvo-líquido y el procedimiento de mezcla para cada grupo se detallan en la Tabla 1, siguiendo recomendaciones del fabricante para WMTA y BC.

Tabla 1 - Materiales asignados a los grupos estudiados.

Group	Materials	Manufacturer
WPC	WPC + 330 μ L de agua destilada	Huascarán, Compañía Minera de Agregados Calcáreos S.A., Lima, Perú.
WPC + NPs-Ag	WPC 99% + NPs-Ag 1% + 330 μ L de agua destilada	Huascarán, Compañía Minera de Agregados Calcáreos S.A., Lima, Peru (WPC) + Sigma Aldrich Ltd., St. Louis, Missouri, USA (NPs-Ag).
WMTA	WMTA + 330 μ L de agua destilada	Angelus Indústria de Produtos Odontológicos S.A., Londrina, Paraná, Brasil.
BC	Drops of the supplied solution.	Septodont Ltd., Saint Maur des Fosses, France.

Fuente: Datos de la investigación (2026).

Caracterización por difracción de rayos X (DRX) y análisis de Rietveld

Las fases cristalinas presentes en el material fueron identificadas mediante análisis de difracción de rayos X (DRX) empleando un difractómetro de polvo modelo D8 Focus (Bruker AXS GmbH, Karlsruhe, Alemania), operado a 40 kV y 40 mA, en un rango angular de $2\theta = 5^{\circ}$ – 100° . La identificación de fases se realizó mediante comparación con patrones de referencia del International Centre for Diffraction Data (ICDD), en concordancia con reportes previos que emplean DRX para diferenciar fases en cementos Portland y MTA.

La cuantificación de fases cristalinas y la estimación del tamaño promedio de cristalito se efectuaron mediante refinamiento de Rietveld usando FullProf Suite, siguiendo el fundamento metodológico descrito para este procedimiento de análisis estructural (Rodríguez-Carvajal, 1993). El uso de cuantificación por Rietveld en cementos hidráulicos es relevante para comparar proporciones de fases asociadas al comportamiento de fraguado y desempeño del material.

Condiciones experimentales

Los ensayos se realizaron bajo condiciones controladas de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y $50 \pm 10\%$ de humedad relativa, con el objetivo de reducir la variabilidad asociada al fraguado y a la hidratación del cemento, factores reconocidos como influyentes en el desempeño de cementos hidráulicos.

Actividad Antimicrobiana

Para la evaluación del potencial antimicrobiano se emplearon las cepas *Enterococcus faecalis* ATCC 29212 y *Candida albicans* ATCC 90028, microorganismos ampliamente utilizados como modelos experimentales debido a su asociación con infecciones endodónticas persistentes y a su capacidad de supervivencia en condiciones ambientales adversas.

Las cepas fueron reactivadas en el Laboratorio de Análisis Microbiológico de Laboratorios OralGram S.A.C. (Lima, Perú). *Enterococcus faecalis* fue cultivado en agar Mueller–Hinton, mientras que *Candida albicans* se cultivó en agar Sabouraud dextrosa (SDA), siguiendo protocolos microbiológicos estandarizados.

La identificación y pureza de las cepas se confirmaron mediante tinción de Gram, evaluación de morfología colonial y características de crecimiento. Para la preparación del inóculo, las suspensiones microbianas se calibraron a una turbidez de 0,5 según la escala de McFarland, correspondiente aproximadamente a $1,5 \times 10^8$ UFC/mL para *E. faecalis* y $1,0 \times 10^6$ UFC/mL para *C. albicans*, asegurando una concentración uniforme para todos los ensayos.

La eficacia antimicrobiana de los materiales estudiados se examinó utilizando el ensayo de difusión en agar, procedimiento comúnmente aplicado para evaluar y comparar el potencial antimicrobiano de biomateriales dentales frente a *E. faecalis* y *C. albicans*.

Las suspensiones microbianas estandarizadas se sembraron por extensión superficial sobre placas de agar Mueller–Hinton (*E. faecalis*) y agar Sabouraud dextrosa (*C. albicans*), con un espesor aproximado del medio de 4 mm, conforme a recomendaciones internacionales. Posteriormente, se realizaron pocillos circulares de 6 mm de diámetro en el agar, en los cuales se colocaron los materiales recién preparados.

Se utilizaron 10 especímenes por grupo ($n = 10$). Las placas se incubaron a 37 °C y los halos de inhibición se evaluaron a las 24 y 48 horas. Como grupos experimentales, WPC y WPC + NPs-Ag, siendo grupo control negativo el agar sin material; como controles positivos, se utilizó WMTA y BC, ampliamente reconocida por su actividad antimicrobiana frente a los microorganismos evaluados.

Los diámetros de las zonas de inhibición se midieron en milímetros (mm) utilizando un calibrador digital (Mitutoyo Corporation, Kanagawa, Japón). Para cada espécimen se realizaron tres mediciones independientes en diferentes direcciones, registrándose el valor promedio final, de acuerdo con criterios utilizados en estudios comparativos de cementos endodónticos.

Análisis estadístico

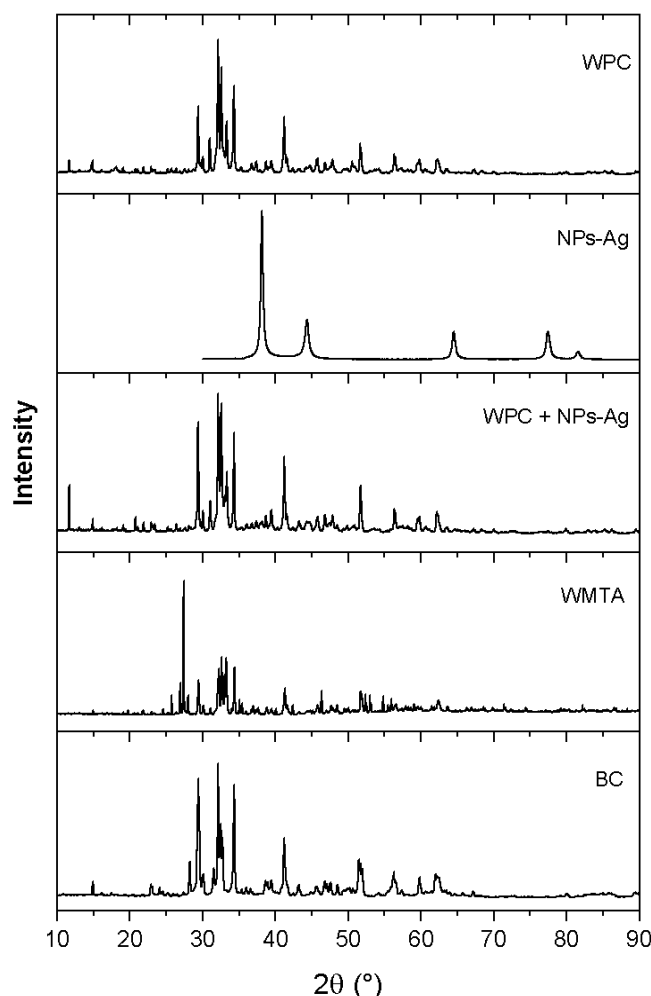
Los resultados se describieron utilizando la media y desviación estándar. El análisis se realizó con STATA v16 (StataCorp LLC, Lakeway, TX, EE. UU.). La comparación entre grupos se efectuó mediante ANOVA unidireccional, seguida de prueba post hoc de Bonferroni, con significancia de $p < 0,05$, enfoque coherente con diseños comparativos utilizados en evaluaciones antimicrobianas de cementos endodónticos.

3. Resultados

Caracterización cristalina por difracción de rayos X

En los resultados de difracción de rayos X (DRx) de las muestras analizadas se muestran en la Figura 1. En la muestra de cemento Portland blanco (WPC) se identificaron predominantemente fases de silicato de calcio, correspondientes a alita (C_3S) y larnita (C_2S), junto con menores proporciones de aluminato de calcio (mayenita, $C_{12}A$), fosfato de calcio (brushita) y óxido de sodio.

Figura 1 - Difractogramas de rayos X de muestras de WPC, NPs-Ag, WPC + NPs-Ag, WMTA y BC.



Fuente: Datos de la investigación (2026).

En la muestra de NPs-Ag se observaron exclusivamente picos característicos de la fase cúbica centrada en las caras (FCC) de la plata metálica, confirmando la pureza cristalina del material.

La muestra experimental WPC + NPs-Ag presentó las mismas fases cristalinas identificadas en el WPC, además de la presencia de la fase correspondiente a plata metálica, lo que indica una adecuada incorporación de las nanopartículas sin modificaciones estructurales detectables en la matriz cementicia.

En el grupo control WMTA, se identificaron fases de silicato de calcio (alita y larnita), acompañadas de óxido de bismuto (bismita) como agente radiopacificador. Por su parte, el grupo BC mostró la presencia predominante de alita (C_3S), junto con carbonato de calcio (calcita) y óxido de zirconio (baddeleyita).

El análisis cuantitativo de las fases cristalinas obtenido mediante el refinamiento de Rietveld se resume en la Tabla 2, donde se presentan los porcentajes en peso de cada fase. El tamaño promedio de los cristales correspondientes a cada fase cristalina se detalla en la Tabla 3.

Tabla 2 - Análisis cualitativo y cuantitativo de las fases cristalinas por difracción de rayos X para todas las muestras.

Sample	Crystalline phase	Amount (wt.%)
WPC	Alite, C3S (Ca_3SiO_5)	40.5
	Larnite, C2S (Ca_2SiO_4)	46.4
	Brushite ($\text{CaPO}_3\text{OH} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	0.6
	Sodium oxide (NaO)	10.1
	Mayenite, C12A ($\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$)	2.4
NPs-Ag	FCC Silver (Ag)	100
WPC + NPs-Ag	Alite, C3S (Ca_3SiO_5)	40.1
	Larnite, C2S (Ca_2SiO_4)	45.9
	Brushite ($\text{CaPO}_3\text{OH} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	0.6
	Sodium oxide (NaO_2)	10.0
	Mayenite, C12A ($\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$)	2.4
	FCC Silver (Ag)	1.0
WMTA	Alite, C3S (Ca_3SiO_5)	52.1
	Larnite, C2S (Ca_2SiO_4)	38.4
	Bismite (Bi_2O_3)	9.5
BC	Alite, C3S (Ca_3SiO_5)	79.3
	Baddeleyite (ZrO_2)	5.6
	Calcite (CaCO_3)	15.1

Fuente: Datos de la investigación (2026).

Tabla 3 - Tamaño promedio de los cristalitos por refinamiento de Rietveld en cada fase.

Samples	Crystalline phase	$\langle D \rangle$ (nm)
WPC	Alite, C3S	113.4 ± 3.9
	Larnite, C2S	57.3 ± 1.7
	Brushite	300 ± 230
	Sodium oxide	67.3 ± 4.5
	Mayenite, C12A	45.0 ± 8.3
NPs-Ag	Silver FCC	20.0 ± 5.0
WMTA	Alite, C3S	127.1 ± 4.8
	Larnite, C2S	82.7 ± 4.2
	Bismite	315.5 ± 9.7
BC	Alite, C3S	108.9 ± 2.1
	Baddeleyite	62.8 ± 2.6
	Calcite	68.6 ± 2.9

Fuente: Datos de la investigación (2026).

Actividad antimicrobiana

Los valores medios y la desviación estándar de los diámetros de los halos inhibitorios frente a *Enterococcus faecalis* ATCC 29212 y *Candida albicans* ATCC 90028, fueron expresados en milímetros (mm), se presentan en la Tabla 4.

El grupo WPC + NPs-Ag mostró zonas de inhibición significativamente mayores frente a ambos microorganismos en comparación con WMTA y BC en los tiempos evaluados ($p < 0,05$). Frente a WPC, el comportamiento fue dependiente del tiempo y del microorganismo: se observó un incremento del halo a 24 h; mientras que a 48 h los valores fueron comparables en *E. faecalis* (Tabla 4).

Tabla 4 – Actividad antimicrobiana de los cementos en *Enterococcus faecalis* y *Candida albicans*.

Groups	WPC	WPC + NPs-Ag	WMTA	BC
<i>Enterococcus faecalis</i>				
24 hours	14.31 $\pm$ 3.06	16.32 $\pm$ 2.17	13.26 $\pm$ 2.18	11.08 $\pm$ 1.03
48 hours	15.97 $\pm$ 2.32	15.89 $\pm$ 3.21	14.07 $\pm$ 1.91	11.94 $\pm$ 0.96
<i>Candida albicans</i>				
24 hours	15.26 $\pm$ 3.30	17.07 $\pm$ 4.06	15.71 $\pm$ 2.15	12.86 $\pm$ 1.86
48 hours	16.98 $\pm$ 2.51	16.31 $\pm$ 3.50	16.22 $\pm$ 3.11	13.12 $\pm$ 1.11

Media y desviación estándar de los diámetros de inhibición del crecimiento en milímetros frente a los microorganismos probados.
Fuente: Datos de la investigación (2026).

4. Discusión

Los CCSC se han consolidado como biomateriales hidráulicos de elección en endodoncia por su capacidad de fraguar en condiciones húmedas, su biocompatibilidad y su adecuado sellado, lo que explica su uso en terapias pulpares y procedimientos de reparación. Estas propiedades se relacionan con su matriz derivada del cemento Portland y con la hidratación de las fases de silicato tricálcico (C_3S) y dicálcico (C_2S), capaces de liberar iones calcio y elevar el pH del entorno (Torabinejad, 1993; Camilleri, 2008; Prati & Gandolfi, 2015; Dawood et al., 2017). En concordancia, la literatura sostiene que estos materiales actúan como biomateriales bioactivos, estimulando respuestas favorables del huésped y favoreciendo condiciones propicias para la reparación tisular (Prati & Gandolfi, 2015; Dawood et al., 2017; Duarte & Ahmadyar, 2013).

En el presente estudio, la caracterización por DRX confirmó que los cementos evaluados estuvieron dominados por fases de silicato de calcio, con predominio de C_3S y C_2S , resultado esperado en matrices tipo Portland y en materiales clínicos basados en silicato de calcio. Esta similitud microestructural entre cemento Portland y WMTA ha sido descrita previamente mediante DRX, identificándose como principal diferencia la incorporación de radiopacificadores (Islam et al., 2006; Camilleri, 2008). En WMTA, la presencia de óxido de bismuto como agente radiopacificante concuerda con estudios que señalan su rol en radiopacidad, aunque con potencial impacto en propiedades fisicoquímicas en función de la formulación (Kim et al., 2008; Camilleri & Gandolfi, 2010). De manera comparable, Biodentine® incorpora otros radiopacificadores (p. ej., compuestos a base de zirconio) y aditivos acelerantes, lo cual puede influir en su comportamiento físico y clínico sin modificar sustancialmente la matriz base de silicato de calcio (Camilleri & Gandolfi, 2010; Dawood et al., 2017; Raman & Camilleri, 2024). Estudios recientes sobre prototipos de cementos de silicato de calcio para terapias pulpares también destacan la relevancia de controlar microestructura y composición para optimizar bioactividad y desempeño (Vega-González et al., 2024; Simila et al., 2024).

Respecto a la interpretación de fases, los resultados apoyan que la fracción de silicatos de calcio constituyó el componente mayoritario del material, coherente con lo reportado para cementos Portland y cementos endodónticos hidráulicos. Investigaciones en ciencia de materiales señala que la microestructura y el tamaño de cristalito se asocian con el fraguado, el desarrollo de resistencia y la reactividad del sistema, tanto en cementos Portland convencionales como en matrices modificadas con adiciones (Ahmad et al., 2023; Pushpan et al., 2023). En el ámbito odontológico, el control microestructural también se considera clave para propiedades como el sellado, la estabilidad y la interacción con tejidos (Camilleri, 2008; Formosa et al., 2013).

Desde el punto de vista antimicrobiano, los hallazgos mostraron que el WPC + NPs-Ag presentó resultados de inhibición de mayor diámetro frente a *Enterococcus faecalis* y *Candida albicans* respecto de WPC, WMTA y Biodentine®. Este resultado es relevante, dado que múltiples estudios describen que la actividad antimicrobiana intrínseca de CCSC puede ser limitada y variable, especialmente frente a microorganismos asociados a infecciones persistentes, como *E. faecalis* y *C. albicans* (Asgary et al., 2009; Jonaidi-Jafari et al., 2007; Jang et al., 2015; Quea Cahuana et al., 2022). Asimismo, comparaciones in vitro recientes reportan diferencias entre MTA, Biodentine y formulaciones modificadas, evidenciando que la modificación del material puede alterar significativamente su desempeño antimicrobiano (Ravindran & Jeevanandan, 2023).

La actividad antimicrobiana de los CCSC se ha relacionado principalmente con la liberación de hidróxido de calcio y la elevación del pH del medio durante la hidratación, lo que genera un entorno desfavorable para diversos microorganismos (Duarte & Ahmadyar, 2013; Prati & Gandolfi, 2015). No obstante, este efecto puede no ser suficiente frente a cepas resistentes. En este escenario, la funcionalización con nanopartículas representa una estrategia de mejora. En particular, la plata a escala nanométrica ha mostrado actividad antimicrobiana robusta, asociada a su interacción con membranas celulares, alteraciones de permeabilidad y liberación de iones Ag^+ , con efectos sobre proteínas y material genético (Martínez-Castañón et al., 2008; Zhang et al., 2009; Dong et al., 2019). La evidencia disponible indica que la adición de NPs-Ag a cementos endodónticos puede aumentar la eficacia antimicrobiana, manteniendo resultados favorables a concentraciones controladas; esto coincide con lo reportado para MTA con nanopartículas de plata (Samiei et al., 2013) y con evidencia de desempeño antimicrobiano y físico-mecánico en cementos Portland blancos micro/nanoparticulados comparados con MTA (Villavicencio et al., 2022). Además, estudios sobre integridad de sellado y microfiltración sugieren que el desempeño clínico de materiales de obturación retrógrada depende no solo del efecto antimicrobiano, sino también del sellado y estabilidad, por lo que los resultados deben interpretarse considerando ambos ejes (Bidar et al., 2010; Formosa et al., 2013).

En paralelo a la estrategia con plata, se han propuesto otras modificaciones para potenciar el efecto antimicrobiano o antibiofilm de cementos de silicato de calcio. Por ejemplo, la asociación del MTA con farnesol ha mostrado actividad antibiofilm y cambios fisicoquímicos relevantes, reforzando la noción de que la funcionalización del cemento puede mejorar su desempeño frente a microorganismos organizados en biopelículas (Castro-Núñez et al., 2024). De forma similar, la combinación de MTA con compuestos liberadores de óxido nítrico ha mostrado actividad antimicrobiana con parámetros adecuados de biocompatibilidad, lo cual apoya el desarrollo de formulaciones híbridas como tendencia actual en biomateriales endodónticos (Shin et al., 2021). Asimismo, investigaciones recientes en cementos de silicato de calcio obtenidos por sol-gel e incorporando colágeno y nanopartículas de biovidrio mesoporoso reportan mejoras biológicas, lo que sugiere que la incorporación de nanofases puede aportar beneficios funcionales adicionales más allá del control microbiano (Simila et al., 2024).

Las discrepancias reportadas en la literatura respecto a la actividad antimicrobiana de Portland/MTA/Biodentine pueden explicarse por diferencias metodológicas (tensión de oxígeno, composición del medio, tiempo de incubación, técnicas de evaluación), lo que afecta el tamaño del halo y la difusión de componentes alcalinos o iónicos. Esta variabilidad se observa en estudios comparativos que reportan resultados divergentes entre materiales, incluso bajo diseños in vitro similares (Asgary

et al., 2009; Jang et al., 2015; Quea Cahuana et al., 2022; Ravindran & Jeevanandan, 2023). Por ello, aunque la técnica de difusión en agar es útil para comparar potencial antimicrobiano, la extrapolación clínica debe realizarse con cautela, idealmente complementándose con ensayos de contacto directo y modelos de biopelícula en futuros trabajos (Koruyucu et al., 2015; Castro-Núñez et al., 2024).

En conjunto, los resultados respaldan que la incorporación de NPs-Ag al cemento WPC puede incrementar significativamente su actividad antimicrobiana frente a *E. faecalis* y *C. albicans*, manteniendo una microestructura de silicato de calcio comparable a los materiales clínicos. Sin embargo, para sustentar su aplicabilidad clínica, se recomienda que investigaciones posteriores incluyan pruebas de citotoxicidad, estabilidad dimensional, resistencia mecánica y desempeño frente a biopelículas, considerando que modificaciones químicas pueden alterar simultáneamente biocompatibilidad y propiedades físicas (Chang et al., 2014; Formosa et al., 2013; Ravindran & Jeevanandan, 2023).

5. Conclusiones

La caracterización mediante difracción de rayos X evidenció que el WPC + NPs-Ag mantiene una matriz cristalina dominada por fases de silicato de calcio, similar a la observada en WMTA y Biodentine®. La integración de 1 % de NPs-Ag no generó cambios estructurales relevantes en el material, pero incrementó su actividad antimicrobiana frente a *Enterococcus faecalis* ATCC 29212 y *Candida albicans* ATCC 90028. Estos hallazgos sugieren que el WPC + NPs-Ag presenta potencial como biomaterial experimental para aplicaciones endodónticas; sin embargo, se requieren estudios adicionales que evalúen su biocompatibilidad y desempeño clínico antes de su uso clínico rutinario.

Referencias

- Ahmad, A., Sutanto, M. H., Ahmad, N. R., Mohamad, M. E., & Bujang, M. (2023). Microstructural characterization of fibric peat stabilized with Portland cement and silica fume. *Materials*, 16(1), 18. <https://doi.org/10.3390/ma16010018>
- Asgary, Z., Zarrabi, M., Javidi, M., Naderinasab, M., & Gharechahi, M. (2009). Comparative evaluation of antimicrobial activity of three cements: New endodontic cement, mineral trioxide aggregate and Portland cement. *Journal of Oral Science*, 51(3), 437–442. <https://doi.org/10.2334/josnusd.51.437>
- Bidar, M., Eghbal, M. J., & Asgary, S. (2010). Comparison of bacterial and dye microleakage of different root-end filling materials. *Iranian Endodontic Journal*, 5(1), 17–22.
- Camilleri, J. (2008). Characterization and chemical activity of Portland cement and two experimental cements with potential for use in dentistry. *International Endodontic Journal*, 41(9), 791–799. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2008.01483.x>
- Camilleri, J., & Gandolfi, M. G. (2010). Evaluation of the radiopacity of calcium silicate cements containing different radiopacifiers. *International Endodontic Journal*, 43(1), 21–30. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2009.01621.x>
- Castro-Núñez, G. M., Tanomaru-Filho, M., Chávez-Andrade, G. M., Torres, F. F. E., Bosso-Martelo, R., & Guerreiro-Tanomaru, J. M. (2024). Physicochemical properties and antibiofilm activity of mineral trioxide aggregate associated with farnesol. *Brazilian Oral Research*, 38, e066. <https://doi.org/10.1590/1807-3107bor-2024.vol38.0066>
- Chang, K. C., Chang, C. C., Huang, Y. C., Chen, M. H., Lin, F. H., & Lin, C. P. (2014). Effect of tricalcium aluminate on physicochemical properties, bioactivity, and biocompatibility of partially stabilized cements. *PLoS ONE*, 9(9), e106662. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0106662>
- Costa Neto, P. L. O., & Bekman, O. R. (2009). *Análise estatística da decisão* (2ª ed.). Editora Blucher.
- Dawood, A. E., Parashos, P., Wong, R., Reynolds, E. C., & Manton, D. J. (2017). Calcium silicate-based cements: Composition, properties, and clinical applications. *Journal of Investigative and Clinical Dentistry*, 8(2), e12195. <https://doi.org/10.1111/jicd.12195>
- Dong, Y., Zhu, H., Shen, Y., Zhang, W., & Zhang, L. (2019). Antibacterial activity of silver nanoparticles of different particle size against *Vibrio natriegens*. *PLoS ONE*, 14(9), e0222322. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222322>
- Duarte, S., & Ahmadyar, M. (2013). Vital pulp therapy using calcium-enriched mixture: An evidence-based review. *Journal of Conservative Dentistry*, 16(2), 92–98. <https://doi.org/10.4103/0972-0707.108174>

- Elahi, M. M. A., Hossain, M. M., Karim, M. R., Zain, M. F. M., & Shearer, C. (2020). A review on alkali-activated binders: Materials composition and fresh properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 260, 119788. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119788>
- Eskandarinezhad, M., Shahveghar-Asl, N., Sharghi, R., Shirazi, S., Shakouie, S., Milani, A. S., & Balaei, E. (2017). Sealing efficacy of mineral trioxide aggregate with and without nanosilver for root-end filling: An in vitro bacterial leakage study. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*, 9(1), e27–e33. <https://doi.org/10.4317/jced.53160>
- Formosa, L. M., Mallia, B., & Camilleri, J. (2013). A quantitative method for determining the antiwashout characteristics of cement-based dental materials including mineral trioxide aggregate. *International Endodontic Journal*, 46(2), 179–186. <https://doi.org/10.1111/iej.12007>
- Islam, I., Chng, H. K., & Yap, A. U. (2006). X-ray diffraction analysis of mineral trioxide aggregate and Portland cement. *International Endodontic Journal*, 39(3), 220–225. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2006.01072.x>
- Jang, V., Chaitanya, K. P., Gandi, P., Patil, J., Dola, B., & Reddy, R. B. (2015). Evaluation of antibacterial and antifungal activity of Biodentine compared to MTA and glass ionomer cement. *Journal of Conservative Dentistry*, 18(1), 44–48. <https://doi.org/10.4103/0972-0707.148889>
- Jonaidi-Jafari, S., Akbari Kamrani, F., & Taheri, S. (2007). Evaluation of antimicrobial effect of MTA, calcium hydroxide, and CEM cement. *Iranian Endodontic Journal*, 2(3), 105–109.
- Kim, E. C., Lee, B. C., Chang, H. S., Lee, W., Hong, C. U., & Min, K. S. (2008). Evaluation of the radiopacity and cytotoxicity of Portland cements containing bismuth oxide. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 105(1), 54–57. <https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2007.09.008>
- Koruyucu, M., Topcuoglu, N., Tuna, E. B., Ozel, S., Gencay, K., & Kulekci, G. (2015). An assessment of antibacterial activity of three pulp capping materials on *Enterococcus faecalis*. *European Journal of Dentistry*, 9(2), 240–245. <https://doi.org/10.4103/1305-7456.156835>
- Martínez-Castañón, G. A., Niño-Martínez, N., Martínez-Gutiérrez, F., Martínez, J. R., & Ruiz, F. (2008). Synthesis and antibacterial activity of silver nanoparticles with different sizes. *Journal of Nanoparticle Research*, 10(8), 1343–1348. <https://doi.org/10.1007/s11051-008-9428-6>
- Mejía Buitrago, S. M. (2015). *Efecto de la relación calcio/silicio y de cationes interlaminares en los módulos elásticos del C-S-H* (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Colombia.
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. Universidade Federal de Santa Maria. <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/15824>
- Prati, C., & Gandolfi, M. G. (2015). Calcium silicate bioactive cements: Biological perspectives and clinical applications. *Dental Materials*, 31(4), 351–370. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.01.004>
- Pushpan, S., Ziga-Carbarín, J., Rodríguez-Barboza, L. I., Sanal, K. C., Acevedo-Dávila, J. L., Balonis, M., & Gómez-Zamorano, L. Y. (2023). Strength and microstructure assessment of partially replaced ordinary Portland cement and calcium sulfoaluminate cement with pozzolans and spent coffee grounds. *Materials*, 16(14), 5006. <https://doi.org/10.3390/ma16145006>
- Quea Cahuana, E., Ramirez Mesías, W., Manrique Coras, M. del C., Anduaga Lescano, S., Basilio Galvez, J., Anhelía Ramirez, S., & Mellado Alfaro, B. (2022). *Antimicrobial efficacy of Portland cement and mineral trioxide aggregate against Enterococcus faecalis and Candida albicans*. Research, Society and Development, 11(3), e2311326172. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i3.26172>
- Raman, V., & Camilleri, J. (2024). Characterization and assessment of physical properties of three single-syringe hydraulic cement-based sealers. *Journal of Endodontics*, 50(3), 381–388. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2024.01.001>
- Ravindran, V., & Jeevanandan, G. (2023). Comparative evaluation of the physical and antimicrobial properties of mineral trioxide aggregate, Biodentine, and a modified fast-setting mineral trioxide aggregate without tricalcium aluminate: An in vitro study. *Cureus*, 15(8), e42856. <https://doi.org/10.7759/cureus.42856>
- Rodríguez-Carvajal, J. (1993). Recent advances in magnetic structure determination by neutron powder diffraction. *Physica B: Condensed Matter*, 192(1–2), 55–69. [https://doi.org/10.1016/0921-4526\(93\)90108-I](https://doi.org/10.1016/0921-4526(93)90108-I)
- Samiei, M., Aghazadeh, M., Lotfi, M., Shakoei, S., Aghazadeh, Z., & Vahid Pakdel, S. M. (2013). Antimicrobial efficacy of mineral trioxide aggregate with and without silver nanoparticles. *Iranian Endodontic Journal*, 8(4), 166–170.
- Shin, J. H., Ryu, J. J., & Lee, S. H. (2021). Antimicrobial activity and biocompatibility of the mixture of mineral trioxide aggregate and nitric oxide-releasing compound. *Journal of Dental Sciences*, 16(1), 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.jds.2020.07.018>
- Shitsuka, R., Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., & Parreira, F. J. (2014). *Matemática fundamental para tecnologia* (2ª ed.). Editora Érica.

Simila, H. O., Anselmi, C., Cardoso, L. M., Dal-Fabbro, R., Beltrán, A. M., Bottino, M. C., & Boccaccini, A. R. (2024). Sol-gel-derived calcium silicate cement incorporating collagen and mesoporous bioglass nanoparticles for dental pulp therapy. *Dental Materials*, 40(11), 1832–1842. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2024.08.006>

Tanomaru, R., Šedý, J., Gregor, L., & Voborná, I. (2018). Discoloration after regenerative endodontic procedures: A critical review. *Iranian Endodontic Journal*, 13(3), 278–284. <https://doi.org/10.22037/iej.v13i3.20529>

Torabinejad, M. (1993). Historical and contemporary perspectives on root-end filling materials. *Journal of Endodontics*, 19(8), 432–433. [https://doi.org/10.1016/S0099-2399\(06\)81532-0](https://doi.org/10.1016/S0099-2399(06)81532-0)

Vega-González, M., Domínguez-Pérez, R. A., Higareda-Mendoza, A. E., Domínguez-Pérez, R., Espinosa-Cristóbal, L. F., Sánchez-Lara, Y., & Tajonar, R. G. (2024). The microstructure, composition, physical properties, and bioactivity of calcium silicate cement prototypes for vital pulp therapies. *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*, 22, 22808000241296663. <https://doi.org/10.1177/22808000241296663>

Villavicencio, M. S., Cahuana, E. Q., Ramírez, W., & Delgado, L. (2022). Comparative evaluation of physicochemical properties and antimicrobial activity of white Portland micro- and nanoparticulate Peruvian cement, mineral trioxide aggregate, and neomineral trioxide aggregate. *The Journal of Contemporary Dental Practice*, 23(10), 965–970. <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10024-3420>