



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD
CARRERA DE ODONTOLOGÍA**

“Eficacia del grafeno en prótesis bucal”

Trabajo de Titulación para optar al título de Odontóloga

Autora:

Cantuña Chasipanta, Deysi Jacqueline

Tutor:

Dr. Carlos Alberto Albán Hurtado

Riobamba, Ecuador. 2024

DERECHOS DE AUTORÍA

Yo, Deysi Jacqueline Cantuña Chasipanta, con cédula de ciudadanía 1724510209, autora del trabajo de investigación titulado: “Eficacia del grafeno en prótesis bucal”, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, a la fecha de su presentación.

Deysi Jacqueline Cantuña Chasipanta

C.I. 1724510209

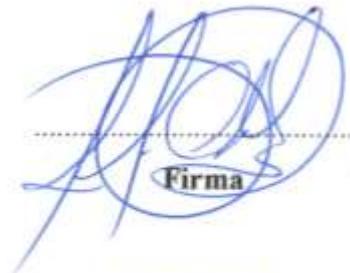
ESTUDIANTE UNACH

DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado del trabajo de investigación “**Eficacia del grafeno en prótesis bucal**”, presentado por **Deysi Jacqueline Cantuña Chasipanta**, con cédula de identidad número **1724510209**, emitimos el DICTAMEN FAVORABLE, conducente a la APROBACIÓN de la titulación. Certificamos haber revisado y evaluado el trabajo de investigación y cumplida la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba a la fecha de su presentación.

Dr. Christian Andres Cabezas Abad
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Firma

Dr. Cristian Roberto Sigcho Romero
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Firma

Dr. Carlos Alberto Albán Hurtado
TUTOR



Firma

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “**Eficacia del grafeno en prótesis bucal**” por **Deysi Jacqueline Cantuña Chasipanta**, con cédula de identidad número 1724510209, bajo la tutoría del Dr. Carlos Alberto Albán Hurtado; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba a la fecha de su presentación.

Dr. Raciél Jorge Sánchez Sánchez
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Firma

Dr. Christian Andrés Cabezas Abad
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Firma

Dr. Cristian Roberto Sigcho Romero
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Firma



Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO

en movimiento



UNACH-RGF-01-04-02.20
VERSIÓN 02: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **CANTUÑA CHASIPANTA DEYSI JACQUELINE** con CC: **172451020-9**, estudiante de la Carrera **ODONTOLOGÍA, NO VIGENTE**, Facultad de **CIENCIAS DE LA SALUD**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado " **EFICACIA DEL GRAFENO EN PROTESIS BUCAL**", cumple con el 2 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 19 de Noviembre de 2024

Dr. Carlos Alberto Albán Hurtado
TUTOR(A) TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad de llegar a cumplir una meta en mi vida y a mis padres por ayudarme en los momentos más difíciles de mi carrera en especial a mi madre quien ha sido mi apoyo y mi ejemplo a seguir a pesar de todas las adversidades quien me enseñó a no rendirme y luchar día a día por mis ideales.

A bebé que está en camino quien va a ser mi soporte incondicional por el que seguiré con mis planes de vida.

A mi hermano quien me apoyo y confía en mí y me dio ánimos para no rendirme gracias por todas tus palabras de aliento.

Y a todos mis docentes quienes me formaron y compartieron sus conocimientos en mi carrera universitaria.

Deysi Jacqueline Cantuña Chasipanta

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento especial a mi tutor académico Dr. Carlos Alberto Albán Hurtado por ser mi guía en este proceso, quien, con su conocimiento me orientó en el desarrollo de este trabajo. A la Universidad Nacional de Chimborazo por darme la oportunidad de pertenecer a tan prestigiosa institución de la que me llevo la mejor experiencia estudiantil. A todos mis docentes quienes me compartieron sus conocimientos los que me han permitido desempeñarme de la mejor manera en esta vida universitaria y como ser humano.

Deysi Jacqueline Cantuña Chasipanta

ÍNDICE GENERAL

DERECHOS DE AUTORÍA	
DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE TRIBUNAL	
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
CERTIFICADO ANTIPLAGIO	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
RESUMEN	
ABSTRACT	
CAPÍTULO I.....	15
INTRODUCCIÓN	15
1.1. Objetivos	17
1.1.1. Objetivo general.....	17
1.1.2. Objetivo general.....	17
CAPÍTULO II.....	18
MARCO TEÓRICO	18
2.1. Historia del grafeno	18
2.2. Composición del grafeno	18
2.3. Propiedades del grafeno	19
2.3.1. Propiedades físicas.....	19
2.3.2. Propiedades mecánicas.....	19
2.3.3. Propiedades químicas.....	20
2.3.4. Propiedades biológicas.....	20
2.4. Características.....	21
2.5. Evaluación de las propiedades del grafeno dental	21
2.6. Uso odontológico.....	22
2.6.1. Ingeniería de tejidos	22

2.6.2.	Implantología	22
2.6.3.	Efecto antibacterial.....	23
2.6.4.	Grafeno como material dental	23
2.7.	Ventajas del grafeno.....	24
2.8.	Desventajas del grafeno	24
2.9.	Biocompatibilidad.....	25
2.10.	Prótesis total	25
2.11.	Prostodoncia	25
2.11.1.	Superficies protéticas	26
2.11.2.	Superficie de apoyo.....	26
2.11.3.	Superficie pulida.....	26
2.11.4.	Superficie oclusal.....	26
2.12.	Principios básicos	26
2.12.1.	Retención.....	26
2.12.2.	Adhesión y Cohesión	27
2.12.3.	Peso	27
2.12.4.	Tensión superficial	27
2.13.	Presentación e indicaciones del material.....	27
CAPÍTULO III.....		28
METODOLOGÍA		28
3.1.	Pregunta PICO.....	28
3.2.	Diseño de investigación	28
3.3.	Tipo de investigación	28
3.4.	Nivel de investigación.....	28
3.5.	Población y tamaño de muestra.....	29
3.5.1.	Población	29
3.5.2.	Muestra.....	29

3.6.	Criterios de selección.....	29
3.6.1.	Criterios de inclusión.....	29
3.6.2.	Criterios de exclusión.....	29
3.7.	Procedimiento de la recuperación de la información y fuentes documentales.....	29
3.8.	Diagrama de flujo PRISMA 2020.....	31
3.9.	Caracterización de los estudios.....	32
3.9.1.	Cantidad de publicaciones anuales.....	32
3.9.2.	Número de publicaciones por ACC (Average Count Citation) y año de publicación.....	33
3.9.3.	Proporción de artículos según cuartil.....	33
3.9.4.	Calidad metodológica según JBI.....	34
3.9.5.	Proporción de artículos según base de datos.....	35
3.9.6.	Origen de los artículos científicos.....	35
3.9.7.	Tipo de estudio los artículos científicos.....	36
CAPÍTULO IV.....		37
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		37
4.1.	Resultados.....	37
4.1.1.	Propiedades y características del grafeno.....	37
4.1.2.	Beneficios y limitaciones del empleo de grafeno en comparación con los materiales convencionales.....	46
4.1.3.	Prótesis con mayor impacto clínico.....	64
4.2.	Discusión.....	68
CAPÍTULO V.....		71
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		71
5.1.	Conclusiones.....	71
5.2.	Recomendaciones.....	71
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Pregunta PICO	28
Tabla 2 Propiedades del grafeno y sus derivados	40
Tabla 3 Principales propiedades mecánicas de polímeros utilizados en odontología protésica	48
Tabla 4 Estudios que evaluaron la eficiencia del grafeno	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Términos de búsqueda y extracción de utilización en las bases de datos.....	31
Figura 2 Diagrama de flujo PRISMA 2020.....	32
Figura 3 Publicaciones por año	33
Figura 4 Cantidad de publicaciones por ACC por año.....	33
Figura 5 Porcentaje de publicaciones por cuartil.....	34
Figura 6 Porcentaje de la calidad metodológica de los estudios.....	34
Figura 7 Porcentaje de publicaciones por base de datos	35
Figura 8 Publicaciones por lugar de origen.....	36
Figura 9 Porcentaje de publicaciones según su tipo	36
Figura 10 Representación diagramática de GO y la síntesis de GO	38
Figura 11 Mecanismos antibacterianos del grafeno.....	43
Figura 12 (a) Prótesis definitiva. (b) Prótesis extraoral postoperatoria.....	66
Figura 13 a) Prótesis dental fija de PMMA reforzado con grafeno. b) Vista extraoral de la sonrisa postratamiento	67

RESUMEN

El objetivo general de esta investigación fue evaluar la eficacia del grafeno en la rehabilitación oral mediante una revisión bibliográfica sistemática, con el fin de determinar su potencial como material innovador en odontología restauradora y prostodoncia. La metodología utilizada se basó en una revisión sistemática de la literatura científica disponible en bases de datos globales como Google Scholar, Elsevier, PubMed, SciELO y Medigraphic, empleando el método PRISMA y la estrategia PICO para formular las preguntas de investigación. Esta investigación fue clasificada como descriptiva, transversal y retrospectiva, con un enfoque cualitativo. La población estudiada incluyó todas las investigaciones y publicaciones nacionales e internacionales sobre el uso del grafeno en prótesis bucales. Siguiendo los criterios de inclusión, se identificaron 65 estudios elegibles para el análisis, seleccionados a través de un muestreo intencional no probabilístico. Los resultados de esta investigación indicaron que el grafeno posee un gran potencial en el ámbito de las prótesis dentales fijas, al mejorar las propiedades mecánicas, estéticas y biológicas de los materiales utilizados. Los estudios y casos clínicos evidencian que el PMMA reforzado con grafeno incrementa la resistencia a la fractura, la durabilidad y la biocompatibilidad, además de ofrecer propiedades antimicrobianas. Aunque es necesaria una mayor validación clínica, los hallazgos actuales sugieren que el grafeno podría transformar la prostodoncia, ofreciendo soluciones más efectivas y satisfactorias para los pacientes.

Palabras clave: grafeno, prostodoncia, PMMA reforzado, eficacia, prótesis.

ABSTRACT

The main objective of this research was to evaluate the effectiveness of graphene in oral rehabilitation through a systematic literature review, aiming to determine its potential as an innovative material in restorative dentistry and prosthodontics. The methodology employed included a systematic review of available scientific literature from global databases, including Google Scholar, Elsevier, PubMed, SciELO, and Medigraphic. The PRISMA and PICO strategies were used to formulate the research questions. This research is classified as descriptive, cross-sectional, and retrospective, employing a qualitative approach. The studied population comprised national and international research publications on graphene in dental prosthetics. Following the inclusion criteria, 65 eligible studies were identified for analysis and selected through non-probabilistic intentional sampling. The results indicated that graphene has significant potential in fixed dental prosthetics by enhancing the materials' mechanical, aesthetic, and biological properties. Studies and clinical cases demonstrate that graphene-reinforced PMMA increases fracture resistance, durability, and biocompatibility while providing antimicrobial properties. Although further clinical validation is needed, current findings suggest that graphene could transform prosthodontics by offering patients more effective and satisfactory solutions.

Keywords: graphene, prosthodontics, reinforced PMMA, efficacy, prosthetics.

Reviewed by:



Lic. Raquel Verónica Abarca Sánchez. Msc.

ENGLISH PROFESSOR

c.c. 0606183804

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En años recientes, el grafeno ha surgido como un material revolucionario en múltiples campos de la odontología, destacando tanto en ingeniería tisular como en el desarrollo de materiales dentales. Su aplicación no se limita a la creación de andamios para la diferenciación y proliferación celular, sino que también mejora las propiedades fisicomecánicas de materiales dentales, como resinas, prótesis dentales, cementos y adhesivos. La incorporación de grafeno optimiza el rendimiento de estos materiales, aumentando su durabilidad y funcionalidad, y proporcionando un mejor ajuste y confort para el paciente. (Mishyn y otros, 2021)

En el ámbito de las prótesis bucales, el grafeno se ha consolidado como un material innovador y eficiente, gracias a sus propiedades a nivel nanométrico. La tecnología G-CAM ha sido pionera en su incorporación, aprovechando los avances en nanotecnología para desarrollar prótesis dentales que satisfacen las altas exigencias de los pacientes en cuanto a rehabilitación oral. Estas prótesis mejoran tanto la funcionalidad como la estética dental. (J. y otros, 2022) Por definición, las prótesis bucales son estructuras compuestas por dientes artificiales que pueden apoyarse en piezas dentales naturales del paciente, restaurando la función masticatoria y devolviendo la estética y confianza en la sonrisa. (Sindi, 2024)

El grafeno se ha integrado en diversos tipos de prótesis dentales, mejorando significativamente sus propiedades. Entre ellos se encuentran las coronas individuales, que se destacan por su biocompatibilidad y alta resistencia mecánica, ofreciendo un aspecto natural y una durabilidad superior en comparación con las coronas convencionales. Los puentes de tres unidades, incrustaciones y carillas también se benefician del grafeno, que proporciona una excelente integración con los tejidos biológicos y una notable resistencia mecánica, simulando de manera efectiva la apariencia y durabilidad de los dientes naturales. (Sindi, 2024)

En el caso de las prótesis completas, el grafeno permite desarrollar soluciones biocompatibles con los tejidos de la cavidad oral y con una resistencia mecánica elevada, superando a las prótesis tradicionales en términos de rendimiento. (Mansouri y otros, 2021) Además, los implantes dentales fabricados con grafeno muestran una capacidad destacada de resistencia mecánica y una gran compatibilidad con los tejidos biológicos, lo que los convierte en una opción muy prometedora para la rehabilitación oral. (Apostu A. y otros, 2023)

El grafeno es un material bidimensional formado por átomos de carbono organizados en una estructura de enlaces sp^2 , que se asemeja a un panal de abejas. Su innovadora aplicación en la nanotecnología dental se manifiesta en el uso de biopolímeros nanoreforzados con grafeno para el fresado mediante tecnología CAD/CAM. El grafeno G-CAM, que se presenta en forma de discos de biopolímero nanoreforzado, está especialmente recomendado para piezas dentales permanentes. Su amplia gama de tonalidades cromáticas contribuye a una apariencia estética y natural, mejorando las propiedades mecánicas, fisicoquímicas y biológicas en comparación con otros materiales odontológicos. (Moldovan y otros, 2023)

Entre sus propiedades destacadas, el grafeno presenta una notable resistencia a la compresión y a la flexión, lo que asegura una alta durabilidad. Además, posee una excelente conductividad térmica y eléctrica, una elevada resistencia a la tracción, una baja densidad y un bajo coeficiente de expansión térmica. Desde el punto de vista biológico, el grafeno destaca por sus características antimicrobianas. Su hidrofobicidad dificulta la adhesión de microorganismos, y la presencia de nano agujas de óxido de zinc sobre las nano placas de grafeno resulta particularmente eficaz contra *Streptococcus mutans*, dañando sus células y evitando su degradación. Estas propiedades no solo contribuyen a una mayor longevidad de la prótesis, sino que también minimizan la pérdida de color y reducen la toxicidad hacia la pulpa dental. (Kanemoto y otros, 2023)

El especialista en rehabilitación oral tiene la obligación de preservar y potenciar la salud bucodental del paciente, lo cual impacta directamente en su calidad de vida. Para cumplir con esta función, debe aplicar tratamientos específicos adaptados a las necesidades individuales de cada caso. (Shanmugam y otros, 2023)

En la actualidad, el GCAM se destaca como el primer producto de grafeno dental disponible en el mercado de la salud. Este material innovador aborda eficazmente las deficiencias mecánicas, químicas y biológicas que presentan otros materiales odontológicos. En comparación con las opciones convencionales, el GCAM proporciona una destacada combinación de baja flexibilidad, alta resistencia a la fractura y excelente biocompatibilidad, lo que lo posiciona como una opción superior para los tratamientos protésicos. (Campos, 2017) El GCAM, al integrar la nanotecnología, presenta propiedades fisicoquímicas avanzadas que contribuyen a su alta biocompatibilidad y acción antibacteriana. Estas características no solo mejoran el rendimiento de las prótesis dentales, sino que también prolongan su durabilidad y eficacia. (P. & F., 2023)

La incorporación de grafeno en diversos materiales ha demostrado proporcionar propiedades avanzadas y mejorar significativamente su rendimiento. Un ejemplo destacado es la adición

de óxido de grafeno a metacrilato de metilo (PMMA), que resulta en un polímero de mayor calidad. Esta combinación mejora las propiedades mecánicas y biológicas del PMMA, beneficiando la retención y estabilidad de los tratamientos protésicos. Así, se garantiza una función masticatoria óptima y se incrementa la calidad de vida de los pacientes al reemplazar prótesis removibles por prótesis híbridas que incorporan PMMA con grafeno. (Sharafeddin & Farhadpour, 2023)

El grafeno, utilizado en tratamientos de prótesis y coronas dentales, ofrece una resistencia y durabilidad superiores. A nivel mundial, el grafeno ha demostrado una tasa de éxito del 80%, siendo patentado por primera vez en Murcia con aplicaciones médicas y estéticas, respaldado por investigaciones de científicos y universidades internacionales. (Yılmaz, 2019) (Abad-Coronel y otros, 2023)

Sin embargo, en el contexto nacional, los estudios sobre el uso de grafeno en odontología son limitados y su conocimiento es aún reducido. La falta de evidencia científica sobre el G-CAM representa un obstáculo significativo para su aceptación y aplicación en el país, dificultando la evaluación de su efectividad y el avance en su implementación.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Evaluar la eficacia del grafeno en el campo de la rehabilitación oral y sus aplicaciones mediante una revisión bibliográfica sistemática de la evidencia científica disponible, con el fin de determinar su potencial como material innovador en odontología restauradora y prostodoncia.

1.1.2. Objetivo general

- Identificar las propiedades y características del grafeno que lo convierten en un material prometedor para su uso en prostodoncia.
- Evaluar los potenciales beneficios y limitaciones del empleo de grafeno en comparación con los materiales convencionales utilizados actualmente en prótesis bucal.
- Determinar el tipo de prótesis donde el uso del grafeno podría tener un mayor impacto clínico en términos de mejora de las propiedades mecánicas, estéticas y biológicas de los materiales dentales.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Historia del grafeno

El material que fue descubierto hace dos décadas, conocido por ser más resistente que el acero y más ligero que el aluminio, ha cobrado gran popularidad esta semana gracias a su versatilidad. En octubre de 2004, los físicos Andre Geim y Konstantin Novoselov se hicieron un nombre en la comunidad científica al dar a conocer, a través de la Universidad de Manchester, su hallazgo de un nuevo material basado en una estructura cristalina del carbono, al que denominaron "grafeno". (Srimaneepong et al., 2022)

Este material presenta propiedades excepcionales que lo distinguen de otros, incluyendo una dureza que supera en 200 veces a la del acero y un peso que es cinco veces más ligero que el del aluminio, sin dejar de ser flexible. Debido a estas características, el anuncio de su descubrimiento generó grandes expectativas, llevando a muchos a denominar al grafeno como "el material del futuro". Además, sus descubridores fueron reconocidos con el Premio Nobel de Física en 2010 por su innovador trabajo en este ámbito. (Srimaneepong et al., 2022)

2.2. Composición del grafeno

Se trata de un material formado por una única capa de átomos de carbono organizados en una estructura hexagonal que se asemeja a un panal de abeja. Es extremadamente delgado, con solo un átomo de grosor, y a la vez es uno de los materiales más fuertes, ligeros y conductores de electricidad y calor que se conocen. (Sahm et al., 2023)

Se lo puede obtener en los siguientes procedimientos:

El proceso describe la obtención de óxido de grafeno a partir de la oxidación del grafito con agentes químicos en un medio ácido, seguido de su dispersión en un disolvente para formar una mezcla. El óxido de grafeno se presenta en tres formas: suspensión, en polvo seco o en finas láminas. Este material se utiliza en odontología para modificar el Polimetilmetacrilato (PMMA), creando una resina dental llamada G-CAM Grafeno. Esta resina, procesada mediante tecnología CAD/CAM, mejora las propiedades microbiológicas y mecánicas, lo que la hace ideal para aplicaciones biomédicas. (Sahm et al., 2023)

2.3. Propiedades del grafeno

2.3.1. Propiedades físicas

El grafeno tiene propiedades estéticas que lo hacen similar a los tejidos de la cavidad oral, lo que permite que el disco G-CAM —un material compuesto de Polimetilmetacrilato (PMMA) modificado con grafeno utilizado en odontología— se vea muy natural. El PMMA es un polímero plástico biocompatible ampliamente utilizado en la fabricación de prótesis dentales debido a su resistencia, ligereza y transparencia. Este disco se procesa mediante la tecnología CAD/CAM (Diseño y Fabricación Asistidos por Computadora), que permite diseñar digitalmente y fabricar prótesis dentales de manera precisa y personalizada. El uso de CAD/CAM en la creación de estos discos asegura una amplia gama cromática, logrando un aspecto lo más realista posible en las prótesis. (Passaretti, 2022) Además, el disco G-CAM presenta una alta temperatura de transición vítrea, lo que evita la distorsión y el ablandamiento durante la limpieza y el uso. (Hajishengallis et al., 2017)

Una de sus características clave es la estabilidad dimensional que aporta a los polímeros en odontología, lo cual es ideal para prótesis dentales, ya que no se ve afectado por el ablandamiento térmico ni la liberación de tensiones con el tiempo. Esto es especialmente importante en prótesis, ya que asegura que mantengan su forma y funcionalidad a lo largo del tiempo. (Zapico y Adserias, mathewsopenaccess) El grafeno es un material de baja densidad, lo que hace que las prótesis sean ligeras. Su buena conductividad eléctrica también contribuye a una sensación óptima frente a cambios de temperatura (frío o calor) en la cavidad oral. (Zapico y Adserias, mathewsopenaccess)

Además, presenta radiopacidad, facilitando la detección de prótesis en radiografías, en caso de que un paciente ingiera o absorba accidentalmente alguna parte. El grafeno también es translúcido, lo que mejora la apariencia estética y permite obtener colores opacos, especialmente útiles en casos de necrosis dental o piezas con pernos metálicos. (Prathap, 2017) Finalmente, su alta estabilidad evita la acumulación de sarro, suciedad y manchas, mejorando la durabilidad y la higiene de las prótesis. (Prathap, 2017)

2.3.2. Propiedades mecánicas

- El grafeno tiene un elevado módulo elástico que, en combinación con el polímero, permite que las prótesis dentales soporten las fuerzas de mordida y masticación sin sufrir deformaciones permanentes. (Gao et al., 2022)
- La integración del grafeno en las prótesis permite fabricar piezas de dimensiones más reducidas sin comprometer su funcionalidad o durabilidad. (Gao et al., 2022)

- Generalmente, las prótesis se rompen debido a la fatiga del material y a las tensiones de flexión, que provocan la aparición de grietas y eventualmente su fractura. (Gao et al., 2022)
- El grafeno mejora significativamente la resistencia al impacto de las prótesis, especialmente en comparación con las removibles, que tienden a romperse fácilmente si se golpean contra superficies duras. (Malta et al., 2019)
- En su forma de disco G-CAM, el grafeno presenta una excelente resistencia a la abrasión, lo que evita que las prótesis se deterioren con el tiempo, ya sea por el consumo de alimentos o por los procesos de limpieza. (Malta et al., 2019)

2.3.3. *Propiedades químicas*

- El disco G-CAM, que contiene grafeno, se caracteriza por ser químicamente inerte, es decir, no reacciona fácilmente con otras sustancias. (Rokaya et al., 2019)
- En los fluidos de la cavidad oral, como la saliva, el grafeno es insoluble, lo que significa que no se disuelve ni degrada en contacto con ellos. (Rokaya et al., 2019)
- Este material no absorbe agua ni saliva, lo que lo hace más higiénico y contribuye a la preservación de sus propiedades mecánicas, evitando que se deterioren con el tiempo. (Khan et al., 2019)
- Además, no se produce bimetalismo, es decir, no hay reacciones químicas indeseadas entre diferentes metales en la prótesis que puedan comprometer su integridad. (Khan et al., 2019)

2.3.4. *Propiedades biológicas*

- El grafeno, utilizado en el disco G-CAM, es un biomaterial no tóxico que no causa irritación en los pacientes, lo que lo hace seguro para su uso en odontología. (Williams et al., 2023)
- Las propiedades de citotoxicidad y genética del disco G-CAM permanecen inalteradas, lo que significa que no afectan las células del organismo ni provocan efectos negativos en la genética. (Williams et al., 2023)
- Este material no provoca alergias, lo que es crucial para asegurar la comodidad y la seguridad del paciente al usar prótesis dentales. (Li et al., 2022)
- Además, el disco G-CAM inhibe la proliferación de hongos y bacterias. Esto se logra a través de un procedimiento de plasma, que ayuda a mantener la higiene y prevenir infecciones en la cavidad oral. (Li et al., 2022)

2.4. Características

Se menciona a las características de material de grafeno:

- Es un material bidimensional. (Srivastava et al., 2022)
- Es súper ligero, en una lámina de grafeno pesa solo 0.77 miligramos en 1 metro cuadrado. (Srivastava et al., 2022)
- Maleable y flexible y puede estirarse sin soportar ningún daño. (Nagesh, 2011)
- Es más dura que diamante. (Salgado et al., Antimicrobial Activity of a 3D-Printed Polymethylmethacrylate Dental Resin Enhanced with Graphene, 2022)
- Cuenta con radiación ionizante, resiste el agua y la deterioro. (Punset et al., 2022)
- No se oxida y es inerte químicamente. (Punset et al., 2022)
- Inhibir el crecimiento bacteriano, hongos y virus. (Punset et al., 2022)
- No daña al ADN humano ya que s carbono, permisible en la medicina regenerativa o industria alimenticia. (Son et al., 2020)
- Puede transformarse al añadir otras sustancias mejorando sus propiedades. (Son et al., 2020)

Debido a estas propiedades del grafeno, en la actualidad se ha efectuado tanto en el campo médico como en la odontología, obteniendo los mejores resultados. (Son et al., 2020)

2.5. Evaluación de las propiedades del grafeno dental

Se han realizado estudios clínicos in vitro en el ámbito de la salud oral y otras áreas relacionadas para evaluar la eficacia de los materiales restauradores que contienen grafeno. Estos estudios han demostrado el éxito y la durabilidad clínica de dichos materiales. (De Angelis et al., In Vitro Mechanical Properties of a Novel Graphene-Reinforced, 2023)

Para evaluar la fractura por esfuerzo compresivo, se utiliza una máquina universal de pruebas. Este equipo mide tanto el tiempo como la fuerza aplicada sobre las muestras. En las pruebas, los modelos de prueba se colocan de manera vertical y se conectan a una punta esférica de acero inoxidable. Esta punta tiene un diámetro que varía entre 0.5 mm y 7 mm, y se aplica sobre la cara oclusal de las muestras, similar a cómo funcionaría una cúspide opuesta. (De Angelis et al., In Vitro Mechanical Properties of a Novel Graphene-Reinforced, 2023)

2.6. Uso odontológico

El grafeno ha sido objeto de investigación en el ámbito odontológico en varios campos, incluyendo la ingeniería de tejidos, la implantología, su aplicación como material antibacteriano y su utilización en la creación de materiales dentales. (Poojar et al., 2017)

2.6.1. Ingeniería de tejidos

Los nanomateriales basados en el grafeno se utilizan como andamios en la ingeniería de tejidos, desempeñando un papel esencial en la adhesión, proliferación y diferenciación celular. Debido a sus propiedades únicas, como la alta conductividad eléctrica, la ligereza y la biocompatibilidad, el grafeno proporciona un entorno óptimo para el crecimiento celular. (Poojar et al., 2017)

Los andamios de grafeno pueden ser diseñados para imitar las características del tejido natural, lo que facilita la integración de células en el sitio de aplicación. Además, se ha demostrado que estos andamios pueden liberar factores de crecimiento y otros compuestos bioactivos, promoviendo así la regeneración de tejidos. Este enfoque se aplica en diversos tratamientos odontológicos, como la regeneración ósea y la reparación de tejidos blandos, mejorando significativamente los resultados clínicos y la funcionalidad a largo plazo de las intervenciones quirúrgicas. (Poojar et al., 2017)

2.6.2. Implantología

La pérdida de dientes se ha transformado en una cuestión de salud pública a escala global, lo que ha llevado a investigar métodos para reemplazar las piezas ausentes mediante prótesis fijas, como son los implantes dentales. (Mocanu et al., 2021) En este contexto, el grafeno se utiliza como material adicional para recubrir implantes dentales, mejorando sus propiedades mecánicas. Los agregados de grafeno optimizan características clave de los metales, como su durabilidad, resistencia y tenacidad, lo que permite que los implantes soporten mejor las fuerzas masticatorias y prolonguen su vida útil en la boca del paciente. (Mocanu et al., 2021) Además, un estudio reciente ha demostrado que la incorporación de grafeno óxido (GO) y grafeno reducido (rGO) en la mezcla de varios tipos de implantes, tanto metálicos como no metálicos, estimula la diferenciación de células madre hacia células osteogénicas. Esto es fundamental para la osteointegración, que es el proceso mediante el cual el implante se adhiere de manera efectiva al hueso, asegurando su estabilidad y funcionalidad a largo plazo. (Liu et al., 2022) Estas características convierten al grafeno en un material muy prometedor

en el ámbito de la implantología, contribuyendo a la mejora de los resultados clínicos en pacientes con implantes dentales. (Mocanu et al., 2021)

2.6.3. Efecto antibacterial

Los biomateriales de grafeno muestran efectos antibacterianos mediante tres mecanismos principales. (Liu et al., 2022):

1. Las nanoestructuras 2D envuelven las bacterias, generando tensión mecánica y bloqueando la absorción de nutrientes. (Ramalho y Silva, 2023)
2. Los bordes afilados del grafeno actúan como nano-cuchillas, desgarrando la membrana celular. (Ramalho y Silva, 2023)
3. Induce estrés oxidativo, produciendo especies reactivas de oxígeno que dañan las bacterias. (Ramalho y Silva, 2023)

Estos mecanismos hacen del grafeno un material útil para prevenir infecciones en odontología. (Ramalho y Silva, 2023)

2.6.4. Grafeno como material dental

El grafeno puede combinar con diferentes materiales como el PMMA para optimar las propiedades: como su dureza, resistencia a la flexión, cambio de forma y desgaste, y experimentando una ampliación en el resultado antibacteriano. (Kanemoto et al., 2023)

G-CAM es un beneficio o producto en conformación de disco de 98.5 mm que colabora con la elaboración de prótesis dentales por el conocido sistema CAD/CAM. Donde C-CAM es un acrílico conocido como termoestable hecho a base resina de polimetilmetacrilato. (Bacali et al., Association of Graphene Silver Polymethyl Methacrylate (PMMA) with Photodynamic Therapy for Inactivation of Halitosis Responsible Bacteria in Denture Wearers, 2021)

El grafeno puede combinarse con diferentes materiales, como el polimetilmetacrilato (PMMA), para mejorar sus propiedades mecánicas. Esta combinación optimiza características clave, como la dureza, la resistencia a la flexión, la estabilidad dimensional y la resistencia al desgaste. Además, potencia los efectos antibacterianos, lo que lo convierte en un material ideal para aplicaciones odontológicas. (Kanemoto et al., 2023)

Uno de los productos destacados es el disco G-CAM, de 98.5 mm, diseñado específicamente para la elaboración de prótesis dentales mediante el sistema CAD/CAM. Este sistema permite la fabricación precisa y personalizada de prótesis. El G-CAM está hecho de un

material acrílico termoestable a base de resina de polimetilmetacrilato (PMMA), que aporta durabilidad y estabilidad a las prótesis dentales, mejorando tanto su apariencia como su funcionalidad. (Bacali et al., Association of Graphene Silver Polymethyl Methacrylate (PMMA) with Photodynamic Therapy for Inactivation of Halitosis Responsible Bacteria in Denture Wearers, 2021)

2.7. Ventajas del grafeno

- Parecido a los tejidos del medio oral, convirtiéndose en un medio estético el disco GCAM con una extensa gama cromática que se la hace ver natural a la pieza dental. (Salgado et al., Antimicrobial Activity of a 3D-Printed Polymethylmethacrylate Dental Resin Enhanced with Graphene, 2022)
- Evita su ablandamiento y distorsión cuando se usa o realiza una limpieza. (A. y SCF., 2023)
- Su estabilidad dimensional ayuda que la prótesis dental no cambie su forma con el pasar del tiempo. (Madaan et al., 2022)
- La consistencia del grafeno es ligera para realizar una prótesis bucal. (Sindi, 2024)
- Gracias a conductividad eléctrica se puede tener una cavidad oral sana. (Sindi, 2024)
- Es radiopaco, lo que lo hace útil en el diagnóstico de accidentes relacionados con prótesis dentales. (Mansouri et al., 2021)
- Reproduce la estética natural del diente, con opciones de colores oscuros y opacos para necesidades específicas. (Apostu A. et al., 2023)
- Previene la acumulación de sarro, manchas y suciedad, manteniendo las prótesis limpias y duraderas. (Apostu A. et al., 2023)
- Sus fluidos orales son insolubles. (Kanemoto et al., 2023)
- Su resistencia a la alteración química lo convierte en un material de bajo mantenimiento y altamente higiénico. (Mishyn et al., 2021)
- La versatilidad de los productos a base de grafeno permite su aplicación en una amplia gama de tratamientos odontológicos, reduciendo márgenes de error y mejorando la durabilidad de los resultados. (Shanmugam et al., 2023)

2.8. Desventajas del grafeno

- A pesar de su gran potencial innovador, el grafeno aún no ha logrado penetrar en el mercado de manera efectiva. (Campos, 2017)

- Los residuos de grafeno pueden ser perjudiciales para la salud cuando no se gestionan adecuadamente. (Campos, 2017)
- La velocidad de producción y la estabilidad del grafeno pueden verse afectadas por tecnologías existentes que no utilizan este material. (Ghodrati y Sharafeddin, 2023)
- Muchos proveedores son reacios a adoptar el grafeno debido a su falta de conocimiento sobre sus propiedades y beneficios. (Sharafeddin y Farhadpour, 2023)
- En términos de costos, el grafeno presenta un precio elevado que puede limitar su accesibilidad. (Yılmaz, 2019)

Estas desventajas pueden generar obstáculos significativos en el desarrollo de materiales dentales, especialmente al considerar su producción en masa y la logística necesaria para distribuirlos a diferentes consultorios. (Abad-Coronel y otros, 2023)

2.9. Biocompatibilidad

El uso de nanomateriales basados en grafeno en odontología ha demostrado ser altamente biocompatible, estimulando la biomineralización celular y promoviendo la diferenciación osteogénica, lo que indica su capacidad para favorecer la osteoconductividad. (Tahriria et al., 2019) Esto es crucial en aplicaciones como implantes dentales, donde la integración con el tejido óseo es fundamental. Cuando el grafeno se implanta en la cavidad bucal, las células madre primordiales se expanden y diversifican, generando beneficios significativos en la reparación y regeneración del tejido. (Srimaneepong et al., 2022) Además, la biocompatibilidad del grafeno significa que no provoca reacciones adversas en el organismo, lo que lo convierte en un material seguro para su uso en tratamientos odontológicos.

2.10. Prótesis total

La especialidad de Rehabilitación Oral se encarga de reparar y restaurar tanto la estética como la función masticatoria del paciente mediante el uso de prótesis totales. Estas prótesis son dispositivos diseñados para reemplazar todas las piezas dentales en una arcada, brindando soporte a los tejidos blandos y mejorando la apariencia facial. Para lograr este objetivo, se realiza un diagnóstico exhaustivo y se crea un plan de tratamiento personalizado según las necesidades particulares de cada paciente. Esto asegura que la prótesis cumpla con los objetivos funcionales y estéticos requeridos en cada caso. (Sahm et al., 2023)

2.11. Prostodoncia

La prostodoncia es la especialidad de la odontología que se orienta en la rehabilitación de pacientes que han perdido la totalidad de sus dientes. Se considera "rehabilitación

fisiológica" porque la pérdida dental afecta funciones cruciales como la estética, la masticación, la fonética y la deglución. Los prostodoncistas utilizan diversas técnicas y dispositivos protésicos para restaurar estas funciones y optimizar la calidad de vida de los pacientes. (Passaretti, 2022)

2.11.1. Superficies protéticas

Existen tres superficies constitutivas en las prótesis dentales, cada una de las cuales juega un papel fundamental en la estabilidad, adaptación y funcionamiento de la dentadura. Estas superficies son fundamentales para asegurar un ajuste adecuado y un rendimiento óptimo de las prótesis. (Gao et al., 2022)

2.11.2. Superficie de apoyo

La superficie de apoyo se refiere a la impresión tomada de la parte interna de la base de la prótesis, la cual se ajusta a la anatomía de los rebordes residuales. Es importante recordar que esta superficie no debe ser pulida, ya que el pulido puede afectar su capacidad para adaptarse correctamente a la forma de la cavidad bucal. (Rokaya et al., 2019)

2.11.3. Superficie pulida

La superficie pulida se obtiene a través de una técnica de encerado y representa la parte externa de la prótesis. Esta superficie imita la apariencia de una encía artificial y debe ser pulida en todo momento para garantizar un acabado estético y facilitar la higiene bucal. (Khan et al., 2019)

2.11.4. Superficie oclusal

La superficie oclusal se forma a partir de los planos oclusales de los dientes artificiales y se establece mediante una correcta programación oclusal, que considera la relación con los dientes antagonistas. Esta superficie es crucial para asegurar una adecuada funcionalidad masticatoria y una correcta alineación dental. (Williams et al., 2023)

2.12. Principios básicos

2.12.1. Retención

Para que haya retención de la dentadura deben intervenir las siguientes características: Cohesión, adhesión, y peso. (Li et al., 2022)

2.12.2. Adhesión y Cohesión

La cohesión se refiere a la fuerza de atracción que existe entre moléculas del mismo tipo, lo que permite que se mantengan unidas tanto materiales sólidos como líquidos. Por otro lado, la adhesión se produce entre moléculas de diferentes tipos. Un factor clave que influye en la retención de una prótesis es la saliva, que se divide en dos componentes: uno que se adhiere a los tejidos y otro que queda en la superficie de la prótesis. Al momento de retirar la prótesis, esta interacción salival se ve afectada, lo que puede impactar en su estabilidad. (Selva-Otaolauruchi y otros, 2023)

2.12.3. Peso

El peso estructural de la prótesis es un factor importante a considerar. En la parte superior del maxilar, es crucial que la dentadura sea liviana para reducir la fuerza gravitacional que podría causar deslizamientos. Por otro lado, en la mandíbula, se requiere un ligero sobrepeso desde un punto de vista fisiológico. Esto contribuye a mantener la prótesis en su posición, evitando que se desplace con facilidad durante su uso. (Wei et al., 2021)

2.12.4. Tensión superficial

La tensión superficial es una fuerza que actúa en la superficie de un líquido, resultante de la atracción desigual de las moléculas de la superficie hacia el interior del líquido. Esta fuerza permite que la superficie actúe como una membrana elástica, lo que influye en el comportamiento de las gotas y la formación de burbujas. (De Angelis et al., In Vitro Mechanical Properties of a Novel Graphene-Reinforced, 2023)

2.13. Presentación e indicaciones del material

El material grafeno se presenta en forma de disco G-CAM, donde "G-CAM" se refiere a un sistema de fabricación que combina grafeno y acrílico, optimizando las propiedades mecánicas y estéticas de las prótesis dentales. (Selva-Otaolauruchi y otros, 2023) Estos discos están disponibles en diferentes diámetros: 14, 16, 18, 20, 22, 24 y 26 mm, y se fabrican en diversos espesores que pueden alcanzar hasta 30 mm. (Wei et al., 2021) Además, el grafeno está disponible en varias capas cromáticas, lo que mejora la estética de las prótesis, convirtiéndose en un aspecto adicional beneficioso para el campo odontológico. (Wei et al., 2021)

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

3.1. Pregunta PICO

Esta investigación se fundamenta en una revisión sistemática de la literatura científica accesible en las principales bases de datos globales. Para llevarla a cabo, se emplea el método PRISMA, utilizando la estrategia de la pregunta PICO (población, Intervención, comparación, outcomes), la cual es: ¿Cuál es la eficacia del grafeno en prótesis bucal?

Tabla 1
Pregunta PICO

P	Población	Grafeno
I	Intervención	Eficacia
C	Comparación	Prótesis bucal
O	Outcomes (Resultados)	Determinar la eficacia del grafeno en prótesis bucales

Fuente: Elaboración propia, 2024.

3.2. Diseño de investigación

Es documental porque se escogió material bibliográfico de relevancia científica.

3.3. Tipo de investigación

Bibliográfica debido a que se realizó la revisión de información de diversas fuentes investigativas. Transversal porque se ha investigado y revisado información actualizada sobre la eficacia del grafeno a través de la recopilación de artículos científicos publicados en los últimos diez años. Además, la investigación es retrospectiva en la medida en que integra datos relevantes sobre la eficacia del grafeno mediante una exhaustiva revisión de estudios previos del período mencionado.

3.4. Nivel de investigación

Se clasifica como descriptiva ya que se ha detallado la eficacia del grafeno en prótesis bucales.

3.5. Población y tamaño de muestra

3.5.1. Población

Incluye todas las investigaciones y publicaciones, así como otros trabajos realizados a nivel nacional e internacional, que están relacionados con la aplicación del grafeno en prótesis bucales. Para realizar esta revisión, se utilizaron distintos motores de búsqueda, como Google Scholar, Elsevier, PubMed, SciELO y Medigraphic.

3.5.2. Muestra

Según los criterios de inclusión definidos, se identificaron 65 estudios que son elegibles para el análisis, los cuales se seleccionaron a través de un muestreo intencional no probabilístico.

3.6. Criterios de selección

3.6.1. Criterios de inclusión

- Fuentes bibliográficas que ofrecen información relevante sobre la efectividad del grafeno en prótesis dentales.
- Publicaciones científicas, contribuciones clínicas, revisiones sistemáticas y bibliográficas, estudios de casos y metaanálisis lanzados en la última década.
- Artículos científicos clasificados según su promedio general de citas (Average Citation Count - ACC) y la evaluación del factor de impacto de la revista, de acuerdo con el Scimago Journal Ranking (SJR).
- Artículos científicos de acceso libre disponibles en español e inglés.

3.6.2. Criterios de exclusión

- Fuentes de información de literatura que no han sido difundidos aproximadamente hace 10 años.
- Artículos científicos que no están en relación con el tema mencionado.
- Información académica no verificada; tesis, foros, páginas de internet no valida.

3.7. Procedimiento de la recuperación de la información y fuentes documentales

La información fue recopilada a través de cinco bases de datos científicas: Google Scholar, Elsevier, PubMed, SciELO y Medigraphic. Este proceso se realizó de manera sistemática para analizar las variables dependiente (eficacia del grafeno) e independiente (prótesis bucal).

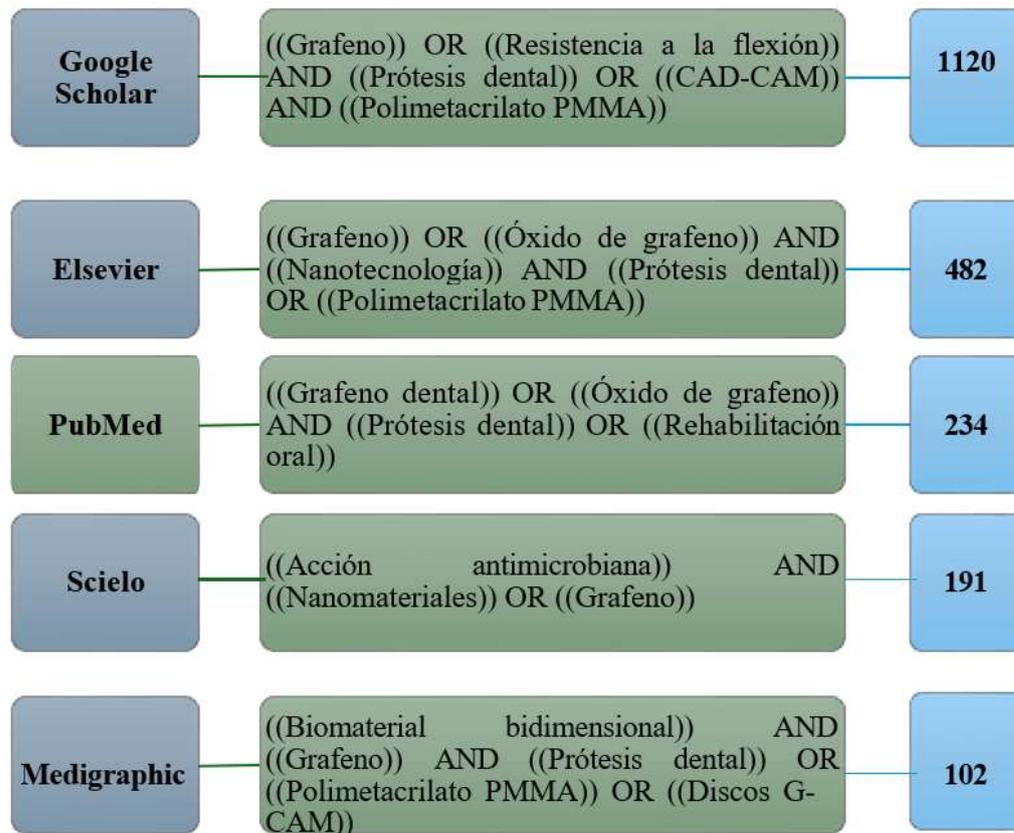
Para iniciar la búsqueda de fuentes bibliográficas, se emplearon operadores booleanos como "AND", "OR" y "NOT" en las diversas bases de datos indicadas. Estos operadores se combinaron con palabras clave y descriptores de búsqueda en español e inglés, incluyendo términos como grafeno, prótesis dental, prostodoncia, materiales dentales y odontología. En esta fase, se identificaron un total de 2,129 artículos, de los cuales, tras aplicar los criterios de inclusión y exclusión previamente establecidos, se seleccionaron 133. A continuación, se verificaron los valores del SJR (Scimago Journal Ranking) y el ACC (Average Count Citation) para tomar una decisión final. El índice SJR mide el factor de impacto de las revistas indexadas en las que se publicaron los estudios, clasificándolas en cuatro cuartiles (Q1, Q2, Q3 y Q4), donde el cuartil 1 (Q1) representa el mayor prestigio y el cuartil 4 (Q4) el menor. Por su parte, el ACC indica el promedio de citas recibidas por cada artículo, teniendo en cuenta tanto el año de publicación como la fuente bibliográfica. En esta investigación, se estableció un ACC superior a 1.5, lo que indica que los artículos seleccionados han sido citados con frecuencia por varios autores, reflejando así una mayor calidad académica y la relevancia de su contenido.

Para asegurar la calidad metodológica de los estudios seleccionados, se emplearon herramientas de evaluación crítica proporcionadas por el Joanna Briggs Institute (JBI), las cuales contribuyen a analizar la confiabilidad, la relevancia y los resultados de los artículos publicados. Estas herramientas se ajustaron a cada tipo de estudio considerado en esta revisión. Se aplicaron listas de verificación específicas para estudios de tipo bibliográfico (E y otros, 2015), experimental (JBI, 2024) y clínico (JBI), con un enfoque en aspectos como la exhaustividad de la búsqueda, el control de posibles sesgos y la validez de los hallazgos obtenidos. Según los puntajes obtenidos, los estudios se clasificaron en tres niveles de calidad: alta (75%-100), media (50%-74%) y baja (0%-49%).

Por último, luego de aplicar todos los criterios mencionados, se seleccionaron 65 artículos para llevar a cabo este trabajo de investigación. Esta selección se basa en su calidad, relevancia y capacidad para aportar información valiosa al estudio de la eficacia del grafeno en prótesis bucales.

Figura 1

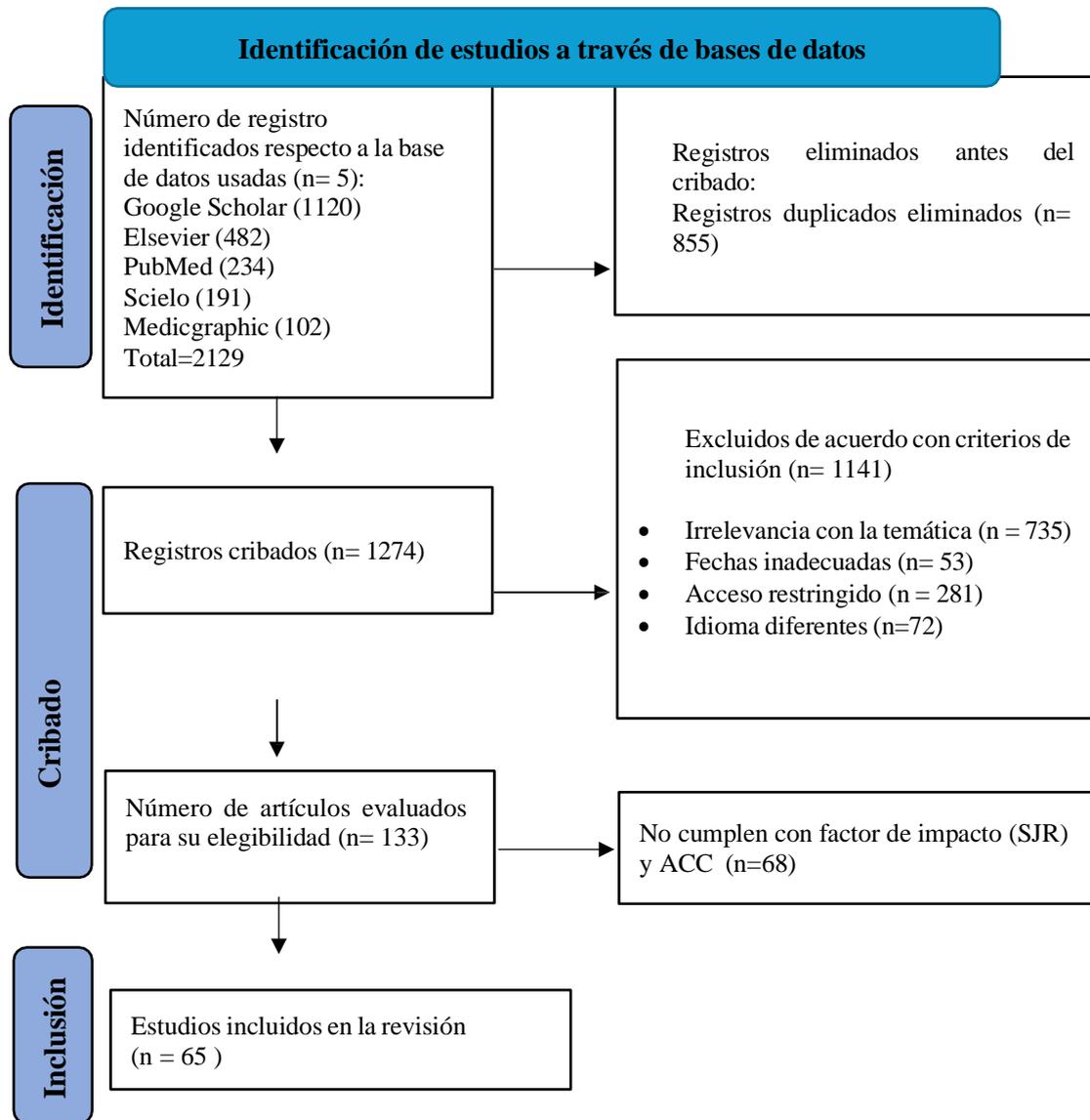
Términos de búsqueda y extracción de utilización en las bases de datos



Fuente: Elaboración propia

3.8. Diagrama de flujo PRISMA 2020

Figura 2
Diagrama de flujo PRISMA 2020



Fuente: Elaboración propia, 2024.

3.9. Caracterización de los estudios

3.9.1. Cantidad de publicaciones anuales

Se evidencia que la mayor cantidad de publicaciones se dio en los años 2023 y 2022, con 19 y 15 artículos respectivamente. Le siguen 2024, con 11 artículos, y 2021, con 8. Durante 2020 se registraron 4 publicaciones científicas, mientras que en 2018 se contabilizaron 4. Entre 2014 y 2017, solo se publicaron 1 artículos, uno en 2015.

Este análisis refleja que la mayoría de la información revisada es reciente, destacando una tendencia marcada en los últimos tres años. Esto subraya la pertinencia y vigencia de los estudios analizados.

Figura 3
Publicaciones por año



Fuente: Elaboración propia, 2024.

3.9.2. Número de publicaciones por ACC (Average Count Citation) y año de publicación

El año 2019 presenta el índice ACC más alto, con un notable 25.7, lo que indica que las publicaciones de ese periodo son ampliamente referenciadas y valoradas dentro de la comunidad científica. En contraste, el año 2024 registra un ACC de 2.2, lo cual es comprensible, dado que los artículos recientes aún no han tenido el tiempo necesario para acumular un número significativo de citas.

Figura 4
Cantidad de publicaciones por ACC por año



Fuente: Elaboración propia, 2024.

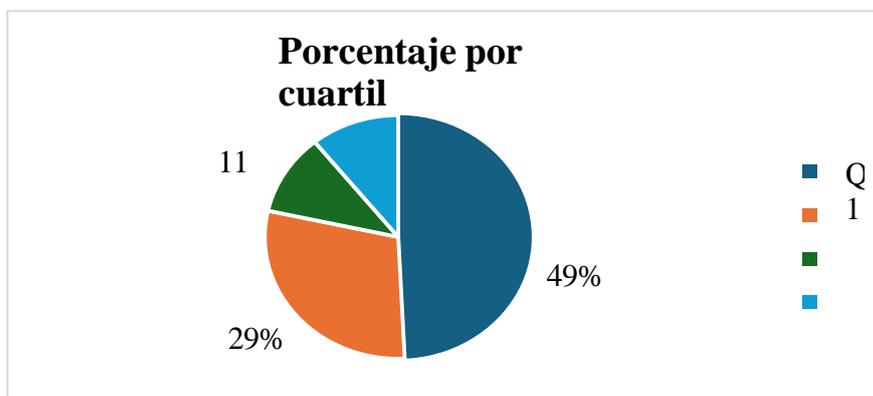
3.9.3. Proporción de artículos según cuartil

La mayor parte de las revistas analizadas pertenecen al cuartil 1, que representa el 49% del total, es decir, 32 artículos. A continuación, se encuentra el cuartil 2, que comprende el 29% con 19 artículos. El cuartil 3 y cuartil 5 abarcan el 11%, con 7 artículos cada uno.

Este análisis resalta la destacada cantidad de artículos publicados en revistas de gran impacto, lo que indica que la gran mayoría de los estudios revisados provienen de fuentes de gran reconocimiento y calidad superior.

Figura 5

Porcentaje de publicaciones por cuartil



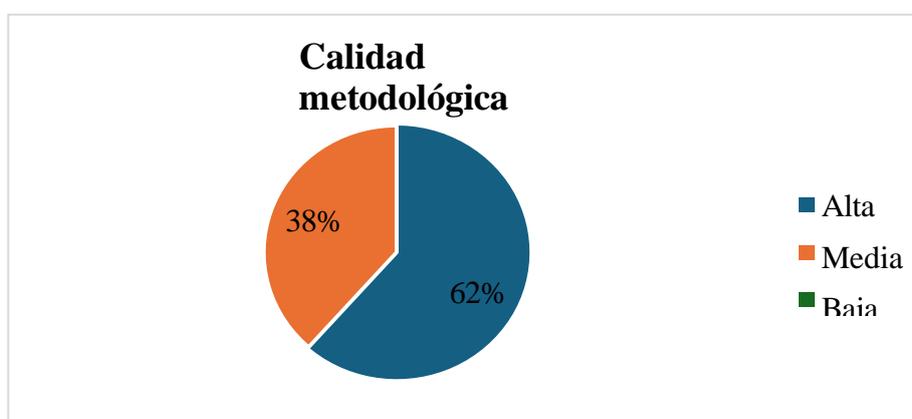
Fuente: Elaboración propia, 2024.

3.9.4. Calidad metodológica según JBI

De entre los estudios analizados, el 62% (40 estudios) se considera de buena calidad, mostrando un cumplimiento sólido de los criterios metodológicos, lo que fortalece la confianza en sus resultados. En cambio, el 38% (25 estudios) demuestra una calidad promedio: aunque en términos generales cumplen con los criterios establecidos, presentan ciertas restricciones que podrían influir en la interpretación o aplicación de sus resultados, sin llegar a comprometer completamente su legitimidad. No se encontraron estudios de mala calidad, lo que destaca la rigurosidad en la selección de estos trabajos y proporciona una base de evidencia confiable para los análisis y conclusiones de esta revisión.

Figura 6

Porcentaje de la calidad metodológica de los estudios



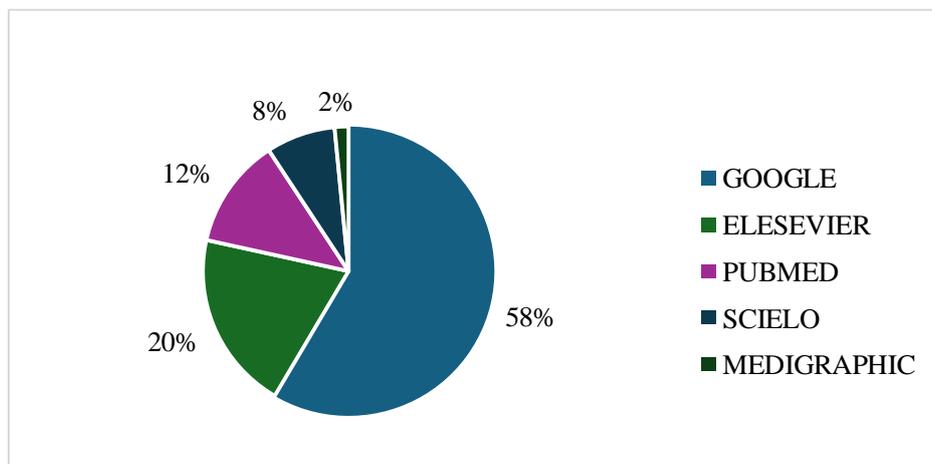
Fuente: Elaboración propia, 2024.

3.9.5. Proporción de artículos según base de datos

El análisis de las fuentes documentales obtenidas muestra que Google Scholar es la base de datos más relevante, aportando el 58% del total con 38 artículos. Esta amplia representación destaca a Google Scholar como una herramienta valiosa para acceder a investigaciones pertinentes en el campo. Le sigue Elsevier, que contribuye con un 20%, lo que equivale a 13 artículos. El 22% restante se distribuye entre las otras tres bases de datos, que complementan la diversidad de las fuentes documentales.

Figura 7

Porcentaje de publicaciones por base de datos



Fuente: Elaboración propia, 2024.

3.9.6. Origen de los artículos científicos

Se identificó que Suiza es el país que aportó el mayor número de fuentes documentales, con un total de 24 artículos, seguido de los Países Bajos con 9 y Estados Unidos con 7. El resto de los países contribuyen con cifras menores, como se refleja en el gráfico 5. Esta distribución global resalta la relevancia y el interés internacional en la generación de conocimiento sobre el tema tratado en esta investigación.

Figura 8
Publicaciones por lugar de origen

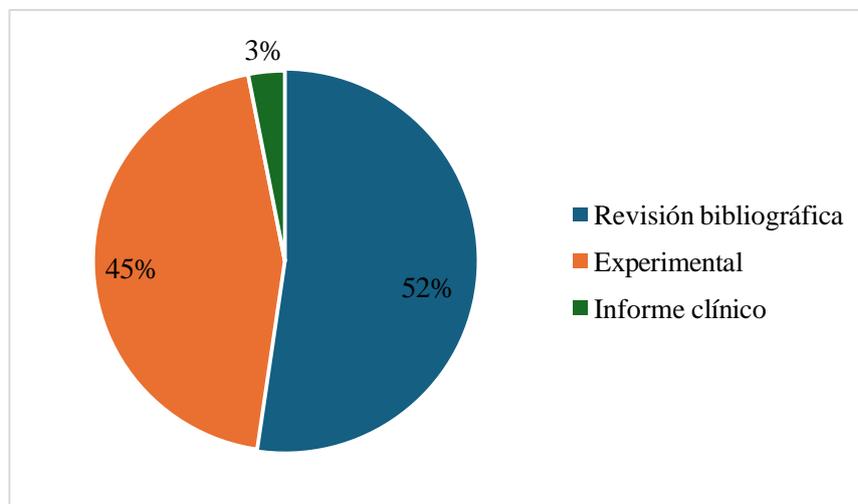


Fuente: Elaboración propia, 2024.

3.9.7. Tipo de estudio los artículos científicos

El análisis revela que la mayor parte de los artículos revisados corresponden a estudios de tipo bibliográfico, representando el 52% con un total de 34 publicaciones. Los estudios experimentales también tienen una presencia notable, abarcando el 45% de los artículos, mientras que los informes clínicos son significativamente menos frecuentes, constituyendo solo el 3% con 2 publicaciones. Esto sugiere que hay una preferencia más fuerte por realizar revisiones teóricas y analizar la literatura en lugar de llevar a cabo estudios experimentales.

Figura 9
Porcentaje de publicaciones según su tipo



Fuente: Elaboración propia, 2024.

CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. *Propiedades y características del grafeno*

La nanotecnología se ha consolidado como una de las innovaciones más relevantes del siglo XXI, impactando de manera notable en diversas ramas de la medicina. Los materiales utilizados en aplicaciones médicas, especialmente aquellos que permanecen en contacto prolongado con el cuerpo humano, deben cumplir con ciertos requisitos mecánicos y biológicos. Estos requisitos incluyen la capacidad de no interferir con el entorno del huésped, prevenir el crecimiento bacteriano en su superficie y evitar inducir respuestas inflamatorias. (Apostu A. y otros, 2023) En este sentido, los nanomateriales se destacan por sus propiedades antibacterianas, ganando cada vez más relevancia en múltiples disciplinas médicas, con un énfasis particular en la odontología. Comparados con otros biomateriales, estos nanomateriales ofrecen una actividad antimicrobiana superior sin comprometer las propiedades mecánicas de los materiales dentales. (Liu y otros, 2022)

Desde su descubrimiento en 2004, el grafeno ha ganado reconocimiento como uno de los nanomateriales más prometedores, especialmente debido a sus excepcionales propiedades antibacterianas, lo que lo convierte en un material de gran interés en el ámbito médico. (Asanah y otros, 2022) Los compuestos que contienen grafeno exhiben características sobresalientes, que incluyen notables propiedades mecánicas, actividad antibacteriana intrínseca, una amplia área de superficie, buena compatibilidad biológica y la capacidad de promover la diferenciación de células madre. (Liu y otros, 2022) (Guazzo y otros, 2018)

La prostodoncia, centrada en la rehabilitación protésica de dientes ausentes, utiliza intensivamente una variedad de biomateriales, incluyendo metales, resinas acrílicas, cerámicas y polímeros adhesivos en la fabricación de prótesis dentales, unidades de prótesis parciales fijas (FPD), prótesis maxilofaciales e implantes dentales. Estos materiales deben enfrentar un entorno oral adverso, expuestos a factores como la presión mecánica de la masticación, el contacto constante con la saliva y las variaciones en temperatura y pH. Estas condiciones pueden dar lugar a problemas tales como el desgaste de la prótesis, cambios de color, contracciones por polimerización y fracturas inducidas por estrés. En este contexto, la incorporación de nanocompuestos como el grafeno representa una solución innovadora que

tiene el potencial de mejorar significativamente las propiedades físicas y mecánicas de los materiales protésicos. (Duraismy y otros, 2021)

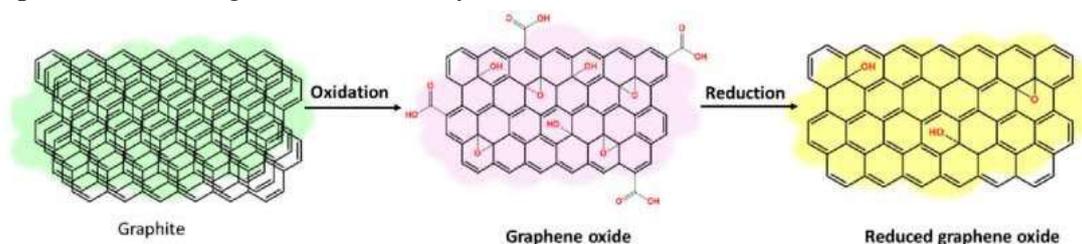
Este alótropo del carbono se presenta como una monocapa plana con una estructura hexagonal bidimensional, formada por nanoláminas de un solo átomo de grosor. Fue sintetizado por primera vez con éxito por Geim y Novoselov en 2004. (Qi y otros, 2021). Actualmente se considera el material más delgado y resistente que se conoce (Li y otros, 2022). Su estructura reticulada en forma de panal destaca su naturaleza bidimensional (2D), lo que lo convierte en un material prometedor para múltiples aplicaciones. (Hussein, Dimensional Optimization of Graphene-Modified Polymethyl Methacrylate Material Used as an Aesthetic Removable Partial Denture Clasp Material, 2023)

No obstante, la implementación del grafeno puede verse limitada por problemas como la aglomeración y las dificultades en su procesamiento. Para abordar estas restricciones, es esencial llevar a cabo modificaciones químicas que permitan la creación de derivados del grafeno. (Rygas y otros, 2023)

Los derivados del grafeno incluyen grafito ultrafino, grafeno de pocas capas (FLG), óxido de grafeno (GO) en monocapas o pocas capas, óxido de grafeno reducido (rGO) y nanohojas de grafeno (GNS). (Guazzo y otros, 2018) (Li y otros, 2022) Estas variantes se distinguen entre sí por sus propiedades superficiales, el número de capas y su tamaño. (Ziyu y otros, 2018) El óxido de grafeno (GO) y el óxido de grafeno reducido (rGO) son los derivados más significativos del grafeno, ya que comparten estructuras similares, pero desempeñan funciones distintas. El GO, conocido por su alta capacidad oxidativa, se produce mediante la oxidación energética del grafito a través del método de Hummers, utilizando agentes oxidantes. En contraste, el rGO se obtiene mediante procesos de reducción química o térmica del GO, lo que modifica sus propiedades y aplicaciones. (Zhang y otros, 2021)

Figura 10

Representación diagramática de GO y la síntesis de GO



Fuente: Amal, 2024. (Amal, 2024)

El óxido de grafeno (GO) y el óxido de grafeno reducido (rGO) han demostrado poseer propiedades físicas y químicas superiores, lo que los convierte en materiales prometedores para diversas aplicaciones tecnológicas. (Shin y otros, Biomaterials Research) En el ámbito de la odontología, estos materiales basados en grafeno se destacan especialmente, ya que el GO ha sido reconocido como un dopante valioso para mejorar la calidad de los materiales dentales. (Li y otros, 2022) Su capacidad para proporcionar un comportamiento antimicrobiano eficaz, mejorar la biocompatibilidad y facilitar la ingeniería de tejidos los hace particularmente relevantes en el desarrollo de prótesis dentales y biomateriales utilizados en tratamientos odontológicos. (Pandit y otros, 2021)

4.1.1.1. Propiedades fisicoquímicas y mecánicas

Como se ha mencionado el grafeno ha generado un notable interés en el campo de los materiales gracias a sus excepcionales propiedades fisicoquímicas y mecánicas. (Qi y otros, 2021) Este material está constituido por una sola capa de átomos de carbono organizados en una estructura hexagonal y es considerado el más resistente jamás analizado, siendo aproximadamente 200 veces más fuerte que el acero. (Inchingolo y otros, 2023) (Apostu A. y otros, 2023) Además, una lámina de grafeno de un metro cuadrado pesa apenas 0.77 miligramos, y se estima que cuatro capas de grafeno pueden soportar el peso de un elefante. (Abad-Coronel y otros, 2023) (18) A pesar de su rigidez, el grafeno es casi transparente, elástico y flexible, características que lo hacen aún más atractivo para diversas aplicaciones. (18)

Entre las propiedades más destacadas del grafeno se encuentran su notable estabilidad en dimensiones extremadamente pequeñas —100.000 veces más delgado que un cabello— y su alto nivel de cohesión. (Apostu A. y otros, 2023) También se caracteriza por su ligereza, con una alta conductividad térmica que alcanza hasta 500 W/mK. Además, el grafeno exhibe una resistencia a la compresión y a la tensión de hasta 130 GPa antes de fracturarse. (Hrishikesh y otros, 2023) (Abad-Coronel y otros, 2023) Otras características notables incluyen su impermeabilidad, densidad (ni siquiera el helio puede atravesarlo) y su naturaleza ecológica. Estas propiedades únicas hacen del grafeno un material especialmente atractivo en el ámbito de la odontología. (Abad-Coronel y otros, 2023)

Para proporcionar una visión más detallada, la Tabla 1 presenta las propiedades del grafeno y sus derivados. Es fundamental señalar que estas propiedades pueden variar entre diferentes muestras. (Amal, 2024)

Tabla 2

Propiedades del grafeno y sus derivados

Propiedad	Valor	Observación
Ancho atómico	0,335 nm de espesor de un solo átomo	
Movilidad electrónica	200.000 cm ² /(Vs)	Máximo (>100x mayor que el silicio)
Fortaleza	42 N/m	El material más resistente jamás probado (100 veces más resistente que el acero)
Dureza y elasticidad	Comparativamente frágil hasta un 25%	De gran relevancia para la electrónica flexible
Rigidez	-	Igual que el diamante
Impermeabilidad		Incluso el átomo más pequeño no puede atravesar una lámina de grafeno.
Resistividad eléctrica	1 x 10 ⁻⁸ Ω · m	Entre los materiales conocidos con menor contenido de azufre a temperatura ambiente (35 % menos que el cobre)
Transparencia	Casi transparente	Absorbe sólo 2,3% de luz
Área de superficie	2600 m ²	Grande
Conductividad térmica	500 W/mK	Excepcional
Conductividad eléctrica	108 cm Ws. S2	Alto
Densidad	0.77 mg/mg ³	Material extremadamente ligero
Resistencia a la fractura	130 GPa	Alto
Módulo de Young		
*Grafeno de una sola capa	2,4 ± 0,4 TPa	Material de alta resistencia
*Grafeno de dos capas	2,0 ± 0,5 TPa	

Fuente: Hrishikesh et al., 2023. (Hrishikesh y otros, 2023)

El análisis de las propiedades del grafeno y sus derivados, especialmente en el ámbito mecánico, es fundamental para su aplicación en odontología. (Amal, 2024) Este material sobresale por su notable resistencia física, transparencia, flexibilidad y bajo costo, cualidades que lo posicionan como una opción ideal para la fabricación de empastes, puentes, coronas, prótesis e implantes dentales más resistentes y duraderos, al mismo tiempo que se disminuyen los costos de producción. (Mobarak y otros, 2023) Además, al ser combinado con compuestos bioactivos y añadido a materiales dentales, el grafeno mejora sus propiedades mecánicas, físicas y químicas (Inchingolo y otros, 2023). Su capacidad para integrarse con diversos biomateriales y biomoléculas refuerza su potencial en odontología,

ya que optimiza características esenciales como la resistencia mecánica, la conductividad eléctrica y la estabilidad térmica. (Salgado y otros, 2022)

Numerosos estudios han demostrado que el grafeno mejora significativamente las propiedades de los biomateriales, haciéndolos más duraderos y resistentes. (Malik y otros, 2018) (Vaidya y otros, 2024) De acuerdo con Liu et al., el grafeno no solo refuerza las propiedades mecánicas y fisicoquímicas de los materiales, sino que también es biocompatible y no presenta toxicidad, lo que lo convierte en una opción segura para su uso en aplicaciones médicas y odontológicas. (Liu y otros, 2022)

4.1.1.2. *Propiedades antibacterianas*

Los nanomateriales, en comparación con otros biomateriales, ofrecen una actividad antimicrobiana superior sin afectar negativamente el rendimiento mecánico de los materiales dentales. El grafeno y sus derivados, como el óxido de grafeno (GO) y el óxido de grafeno reducido (rGO), han mostrado un considerable potencial como agentes antibacterianos. (Apostu A. y otros, 2023) A pesar de que aún se está investigando en profundidad cómo actúan sus mecanismos antimicrobianos, los estudios actuales indican que el grafeno puede disminuir la presencia de microorganismos en la cavidad oral, consolidándose como una opción prometedora en el campo dental. (Hrishikesh y otros, 2023) (Salgado y otros, Antimicrobial Activity of a 3D-Printed Polymethylmethacrylate Dental Resin Enhanced with Graphene, 2022)

El grafeno utiliza distintos mecanismos para lograr su actividad antibacteriana. (Williams y otros, 2023) Aunque estos mecanismos suelen coincidir bajo la mayoría de las condiciones experimentales y provocan la muerte de los microorganismos, los procesos que impulsan la acción antimicrobiana de los nanomateriales basados en grafeno pueden diferir según la aplicación específica. (Asanah y otros, 2022)

Uno de los mecanismos físicos mediante los cuales el grafeno ejerce su actividad antibacteriana es mediante el daño directo a la membrana celular de las bacterias, provocado por sus bordes afilados. Este daño altera significativamente la membrana, lo que lleva a la muerte celular. (Williams y otros, 2023) Tanto el óxido de grafeno (GO) como el óxido de grafeno reducido (rGO) cuentan con estos bordes afilados que pueden afectar la integridad de las membranas bacterianas. La efectividad de este daño depende de factores como la densidad del borde y el ángulo de contacto entre la lámina y la membrana celular. (Apostu A. y otros, 2023) (Asanah y otros, 2022) Estudios han evidenciado que las láminas de GO con tamaños más pequeños y bordes más suaves presentan una mayor densidad de bordes,

lo que potencia su efecto antibacteriano. Este efecto comienza a notarse a un ángulo de contacto de 37° , alcanzando su máxima eficacia a 90° . Además, el rGO ha mostrado un impacto más significativo en comparación con el GO. (Asanah y otros, 2022) (Salgado y otros, Antimicrobial Activity of a 3D-Printed Polymethylmethacrylate Dental Resin Enhanced with Graphene, 2022)

Otro mecanismo relevante es la captación celular. Después del contacto entre las láminas de grafeno y las células bacterianas, estas últimas quedan atrapadas, aisladas de su entorno y sin acceso a nutrientes. Este efecto se intensifica al aumentar las dimensiones laterales de las láminas de óxido de grafeno (GO). (Salgado y otros, Antimicrobial Activity of a 3D-Printed Polymethylmethacrylate Dental Resin Enhanced with Graphene, 2022)

En los mecanismos físicos del óxido de grafeno (GO), se observa una contradicción interesante. Las láminas de GO más pequeñas, que tienen una mayor densidad de bordes, son más efectivas para causar un efecto de corte en las bacterias. (Apostu A. y otros, 2023) (Asanah y otros, 2022) Sin embargo, las láminas de mayor tamaño, que cuentan con dimensiones laterales más amplias, son más eficaces para atrapar células bacterianas. Esto sugiere que, aunque las dimensiones reducidas son necesarias para un efecto de corte significativo, las láminas más grandes pueden contribuir a la captura de las bacterias. (Salgado y otros, Antimicrobial Activity of a 3D-Printed Polymethylmethacrylate Dental Resin Enhanced with Graphene, 2022) (Qi y otros, 2021)

En cuanto al mecanismo químico, el grafeno puede causar daño a las células bacterianas al inducir estrés oxidativo mediante la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS). Estas ROS desactivan proteínas y lípidos en las bacterias, interrumpiendo su capacidad de proliferación. (Williams y otros, 2023) El óxido de grafeno (GO) también puede provocar peroxidación lipídica en las bacterias, lo que resulta bactericida al destruir su membrana celular. Se ha observado que los derivados del grafeno generan un gran volumen de ROS, lo que contribuye al estrés oxidativo en los microorganismos (Apostu A. y otros, 2023) (Asanah y otros, 2022) (Salgado y otros, Antimicrobial Activity of a 3D-Printed Polymethylmethacrylate Dental Resin Enhanced with Graphene, 2022) A diferencia de los mecanismos físicos, el estrés oxidativo no está significativamente relacionado con el tamaño del GO; sin embargo, su efecto puede ser considerablemente inhibido por agentes reductores. (Qi y otros, 2021) (Amal, 2024)

El grafeno también puede afectar a las bacterias mediante un mecanismo de transferencia de electrones. En este caso, actúa como un aceptor de electrones, extrayendo electrones de la membrana bacteriana. Esta acción compromete la integridad de la membrana, lo que lleva a

la muerte celular. (Williams y otros, 2023) (Asanah y otros, 2022) (Salgado y otros, Antimicrobial Activity of a 3D-Printed Polymethylmethacrylate Dental Resin Enhanced with Graphene, 2022)

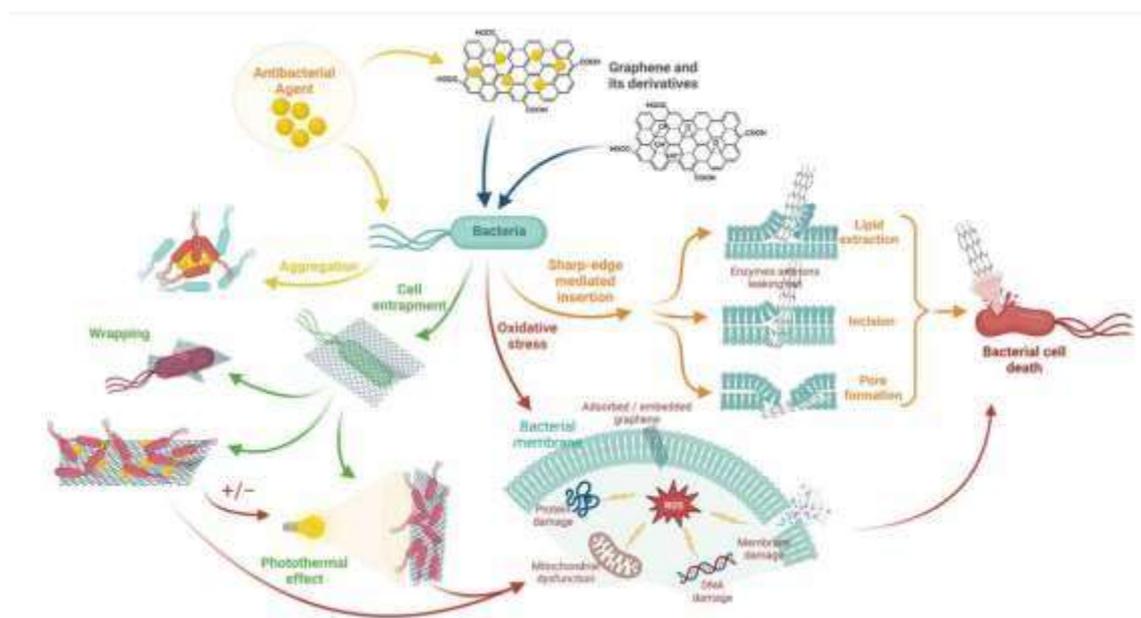
Además, hay otros mecanismos involucrados, como la interrupción de la glucólisis bacteriana, el daño al ADN, la inhibición del crecimiento a través de la envoltura con óxido de grafeno, y la generación adicional de especies reactivas de oxígeno (ROS) mediante el uso de nano burbujas de oxígeno. (Williams y otros, 2023)

Los principales mecanismos implicados en las capacidades antibacterianas del grafeno y sus derivados se presentan en la Figura 8.

Figura 11

Mecanismos antibacterianos del grafeno

Fuente: Williams, 2023. (Williams y otros, 2023)



Por otra parte, se ha observado que los derivados del grafeno, cuando se combinan con otros metales, presentan propiedades antibacterianas mejoradas (Williams y otros, 2023). Se han realizado diversos estudios sobre el efecto antibacteriano de los derivados del grafeno en bacterias periodontopatógenas. Uno de ellos comparó compuestos de rGO y plata (rGp-NS-Ag) con nanopartículas de plata (AgNP) y nano hojas de rGO, revelando que rGp-NS-Ag presentaba efectos antimicrobianos significativamente mejorados. (Kumari y otros, 2023) Al igual que otras propiedades del grafeno, su actividad antibacteriana está influenciada por el tiempo de exposición, la concentración del material, la actividad bacteriana y diversas propiedades fisicoquímicas. (Hussein, Biomechanical Performance of PEEK and Graphene-

Modified PMMA as Telescopic Removable Partial Denture Materials: A Nonlinear 3D Finite Element Analysis, 2022) Además, estas características pueden variar según el tipo de bacterias empleadas en las pruebas, demostrando una notable efectividad contra bacterias tanto Gramnegativas como Grampositivas. (Guazzo y otros, 2018) (Pandit y otros, 2021) Mientras las altas concentraciones de óxido de grafeno (GO) inhiben la formación de biopelículas en bacterias tanto Grampositivas como Gramnegativas,

las bajas concentraciones pueden, en cambio, favorecer su desarrollo, generando así un efecto completamente opuesto al deseado. Aunque podría parecer que el grafeno ejerce un efecto antibacteriano sobre las bacterias y sus biopelículas, estudios han demostrado que concentraciones inferiores a 50 µg/mL de GO en un medio nutritivo no solo carecen de actividad antimicrobiana, sino que también pueden potenciar el crecimiento bacteriano al funcionar como una biopelícula por sí mismo. (Tahriria y otros, 2019)

Es importante resaltar que las propiedades antibacterianas del grafeno no solo contribuyen a su eficacia como agente antimicrobiano, sino que también mejoran la biocompatibilidad de los materiales empleados en prostodoncia. (Mobarak y otros, 2023)

4.1.1.3. Biocompatibilidad

La biocompatibilidad es fundamental en todas las estrategias de tratamiento, ya que permite que un material funcione eficazmente en el entorno oral sin causar daños locales o sistémicos. Esto implica que la interacción entre el material y el organismo debe ser armoniosa, evitando reacciones adversas o efectos nocivos. (Woźniak-Budych y otros, 2023) (Apostu A. y otros, 2023) En este contexto, la biocompatibilidad se convierte en un requisito esencial para todos los materiales de restauración, complementándose con propiedades físicas, mecánicas y estéticas que garantizan un rendimiento adecuado y una durabilidad estructural a largo plazo. (Muhannad y otros, 2020)

Al igual que con cualquier material biomédico, antes de incorporar grafeno en aplicaciones dentales, es crucial evaluar su biocompatibilidad. Este material, junto con los nanomateriales derivados del grafeno, está ganando un reconocimiento creciente en el ámbito odontológico, lo que subraya la importancia de garantizar que presenten biocompatibilidad óptima (Tahriria y otros, 2019) Por lo tanto, realizar estudios sobre biocompatibilidad y citotoxicidad es fundamental para facilitar la adecuada implementación del grafeno en odontología. (Li y otros, 2022)

El grafeno es un material que se distingue por su naturaleza hidrófoba, mientras que el óxido de grafeno (GO) tiene una ligera tendencia a ser hidrófilo, lo que se debe a la presencia de

grupos funcionales que contienen oxígeno en su estructura. (Hrishikesh y otros, 2023) Esta variación en las propiedades de hidrofiliidad sugiere que el GO podría ofrecer una mayor citocompatibilidad en comparación con el grafeno. De hecho, se ha encontrado que las nanopartículas de grafeno que son hidrófilas tienden a exhibir mejor biocompatibilidad que sus homólogas hidrófobas. (Kumari y otros, 2023)

Un ejemplo de esto se presenta en el estudio realizado por García et al., que evidenció que el GO, tanto en forma aislada como en combinación con polimetilmetacrilato (PMMA), posee una biocompatibilidad aceptable. Esta característica podría no solo facilitar la proliferación celular y la regeneración de tejidos, sino también mejorar las propiedades físico-mecánicas del PMMA. Por lo tanto, la selección de materiales como el GO resulta fundamental en aplicaciones biomédicas para optimizar la compatibilidad biológica y el rendimiento mecánico. (García-Contreras y otros, 2021)

Para un desarrollo más seguro de grafeno y los nanomateriales basados en grafeno es necesario comprender la interacción del grafeno y sus derivados con los sistemas vivos y su toxicidad in vivo e in vitro. Para que el material tenga una biocompatibilidad excelente, los resultados obtenidos in vitro también deben reproducirse in vivo. (Hrishikesh y otros, 2023) (Tahriria y otros, 2019) Antes de afirmar que el grafeno tiene una excelente función in vivo, debe evaluarse en función de sus cualidades físicas y químicas in vitro, principalmente en lo que respecta a su potencial toxicológico, asegurando que los factores que resultan en la citotoxicidad del grafeno sean reconocidos y eliminados para evitar la interrupción de futuros esfuerzos y estudios transnacionales in vitro. (Tahriria y otros, 2019)

Aunque los experimentos in vivo con grafeno son pocos y los resultados de los experimentos in vitro no es un concepto que se pueda generalizar, ya que depende de varios factores fisicoquímicos. (Hrishikesh y otros, 2023) Además, numerosos investigadores han discutido cómo la concentración y la funcionalización de la superficie afectan la biocompatibilidad del grafeno. Se ha evidenciado que estos factores influyen en la toxicidad de manera dependiente de la dosis. (Li y otros, 2022) Sin embargo en base a varios estudios se puede deducir que las formas hidrofóbicas de los nanomateriales basados en grafeno son más tóxicas que las formas más hidrófilas. (Tahriria y otros, 2019)

La biocompatibilidad del grafeno y sus derivados no puede ser asumida ni generalizada de manera definitiva, ya que requiere una evaluación continua tanto en entornos in vitro como in vivo. Esto se debe a que la capacidad de cada material para lograr una biocompatibilidad óptima depende de sus distintas propiedades fisicoquímicas, las cuales varían según su composición y estructura. Por lo tanto, es esencial continuar la investigación para entender con mayor profundidad cómo estas características afectan la interacción con los tejidos

biológicos. (Tahriria y otros, 2019)

4.1.2. Beneficios y limitaciones del empleo de grafeno en comparación con los materiales convencionales

4.1.2.1. Materiales convencionales en prótesis dentales

El polimetilmetacrilato (PMMA) es un polímero sintético que ha sido fundamental en la odontología protésica desde su introducción por el Dr. Walter Wright en 1936. (Bettencourt y otros, 2024) (Dinesh y otros, 2018) Durante más de 80 años, el PMMA se ha establecido como el material predominante en la producción de prótesis dentales, especialmente en las bases de prótesis completas y parciales removibles, así como en prótesis provisionales e implantosoportadas. (Apostu A. y otros, 2023) (Salgado y otros, Mechanical and surface properties of a 3D-printed, 2023) Su popularidad en odontología se debe a su durabilidad, versatilidad y facilidad de manejo, lo que lo convierte en una opción preferida para el reemplazo de dientes mediante sustitutos artificiales en la práctica clínica. (Hrishikesh y otros, 2023)

A medida que la odontología ha evolucionado, las tecnologías utilizadas en esta disciplina también han avanzado. El uso de CAD/CAM ha ganado relevancia al permitir la creación de formas precisas que se adaptan a diversas estructuras biológicas, complementando así las propiedades del PMMA y optimizando su aplicación en prótesis dentales. Además, los desarrollos en informática y software han impulsado la impresión 3D (fabricación aditiva), facilitando la planificación rápida y la producción de objetos en 3D, lo que resulta especialmente útil en la rehabilitación protésica. Estos avances están transformando la manera en que se diseñan y fabrican las prótesis, mejorando la calidad de los tratamientos odontológicos. (Salgado y otros, Antimicrobial Activity of a 3D-Printed Polymethylmethacrylate Dental Resin Enhanced with Graphene, 2022) (Salgado y otros, Mechanical and surface properties of a 3D-printed, 2023)

En el campo de la prostodoncia, los sistemas CAD/CAM han ampliado considerablemente la variedad de materiales disponibles para restauraciones indirectas. (Apostu A. y otros, 2023) Entre ellos, el PMMA CAD/CAM se ha destacado como una de las opciones más utilizadas para prótesis temporales de larga duración, debido a su estructura homogénea y altamente reticulada, que le confiere una notable resistencia a la fractura. (Abad-Coronel y otros, 2023) Este material es sometido a un proceso de polimerización en condiciones controladas de alta presión y temperatura, lo que refuerza su durabilidad. Con los avances en la tecnología CAD/CAM, los polímeros basados en PMMA CAD/CAM presentan ventajas mecánicas superiores en comparación con las resinas PMMA convencionales,

convirtiéndose en una alternativa eficaz para prótesis temporales duraderas. (De Angelis y otros, In Vitro Mechanical Properties of a Novel Graphene-Reinforced, 2023)

Propiedades fisicoquímicas

Como se mencionó el polimetilmetacrilato (PMMA) ha sido un material fundamental en odontología durante varias décadas, gracias a su biocompatibilidad, relativa ausencia de toxicidad y excelente estética. (Hrishikesh y otros, 2023) Este material es fuerte, ligero y presenta una buena resistencia al impacto en comparación con el vidrio y el poliestireno, además de tener una estabilidad ambiental superior a la de la mayoría de los materiales. (Dinesh y otros, 2018)

Una de las principales razones de su popularidad es su facilidad de fabricación y reparación, así como su costo asequible. (Apostu A. y otros, 2023) Las agradables propiedades estéticas y el bajo módulo de elasticidad también contribuyen a su uso en la fabricación de dispositivos protésicos, aparatos oclusales y de ortodoncia. (Beatriz y otros, 2023) Las propiedades fisicoquímicas y mecánicas favorables del PMMA, junto con su relación costo- beneficio, lo convierten en una opción versátil para los profesionales dentales, con una buena aceptación por parte de los pacientes, neutralidad de olor y sabor, y excelentes propiedades estéticas. (Bettencourt y otros, 2024)

El polimetilmetacrilato (PMMA) es un material ampliamente utilizado en la elaboración de prótesis parciales y completas debido a su considerable resistencia a la tracción, que varía entre 48 y 62 MPa, así como su resistencia a la compresión de 75 MPa. Estas características mecánicas están determinadas por diversos factores, incluyendo la composición de la resina dental, el grado de polimerización, los procedimientos tecnológicos aplicados, la capacidad de absorción de agua y las condiciones de almacenamiento y uso posterior de las prótesis dentales. (Bozhana y otros, 2024) (Mobarak y otros, 2023)

La integración de la tecnología CAD/CAM en la fabricación de dentaduras postizas no solo proporciona una estética atractiva, sino que también garantiza durabilidad y un procesamiento eficiente. Esto resulta en una producción más rápida y un ajuste preciso. Además, la resistencia mecánica y la longevidad de estas prótesis son bastante predecibles. Sin embargo, es fundamental considerar que las propiedades mecánicas de las resinas utilizadas en dentaduras fresadas dependen en gran medida de su composición. Factores como la hidrofiliidad, la movilidad y otros parámetros cinéticos están influenciados por la estructura molecular de los comonomeros utilizados. Estudios han demostrado que las resinas acrílicas con grados de conversión más bajos tienden a presentar características mecánicas más débiles. (Bozhana y otros, 2024)

La tabla 3 proporciona una visión general de las propiedades mecánicas más relevantes de los polímeros empleados en el ámbito de la odontología protésica.

Tabla 3

Principales propiedades mecánicas de polímeros utilizados en odontología protésica

Tipo	Resistencia a la flexión (MPa)	Módulo elástico	Dureza (MPa)	Dureza (Shore D)
PMMA convencional	65–90	2–3	3–10	75–95
Polímeros fresados mediante CAD/CAM	80–120	2–5	5–15	70–85
Polieteretercetona (PEEK)	90–120	3–4	5–15	80–90

Fuente: Bozhana et al., 2024. (Bozhana y otros, 2024)

El polimetilmetacrilato (PMMA) es un material ampliamente utilizado en la fabricación de prótesis dentales, aunque presenta varias deficiencias que afectan su rendimiento clínico. (Hrishikesh y otros, 2023) Aproximadamente el 70% de las prótesis de PMMA sufren fracturas en los tres años posteriores a su fabricación, con un 29% de estas fracturas localizadas en la línea media maxilar. Las causas de estas fallas incluyen una baja resistencia a la fatiga, baja resistencia al impacto y débil fuerza de adhesión. (Salgado y otros, 2022) Adicionalmente, el desgaste del PMMA y su contracción volumétrica tras la polimerización son factores que contribuyen a la formación de grietas y fracturas prematuras durante el uso clínico. (Hrishikesh y otros, 2023) Este material también es susceptible a la hinchazón y disolución en diversos disolventes orgánicos, debido a la fácil hidrolización de sus grupos éster. (Dinesh y otros, 2018) Aunque el PMMA se emplea principalmente en restauraciones provisionales, sus limitadas propiedades mecánicas lo hacen inapropiado para aplicaciones permanentes. (Apostu A. y otros, 2023) Entre las principales limitaciones de este material para su uso a largo plazo en aplicaciones odontológicas destacan dos aspectos fundamentales: sus propiedades mecánicas y su propensión a la infección bacteriana. (Woźniak-Budych y otros, 2023)

Por otro lado, los bloques CAD/CAM de PMMA presentan desventajas adicionales para el uso a largo plazo, como la baja resistencia al desgaste y a la fatiga, así como una alta susceptibilidad a la adhesión microbiana. (Abad-Coronel y otros, 2023)

Propiedades antimicrobianas

Aunque se ha observado que la adhesión bacteriana a las superficies de PMMA es menor en comparación con otros materiales de base acrílica, su presencia en la cavidad oral aún facilita la formación de biopelícula. (Bacali y otros, Association of Graphene Silver Polymethyl

Methacrylate (PMMA) with Photodynamic Therapy for Inactivation of Halitosis Responsible Bacteria in Denture Wearers, 2021)

El polimetilmetacrilato (PMMA) presenta una alta susceptibilidad a la colonización bacteriana por *Candida albicans* y otros patógenos. Esto puede llevar a la estomatitis protésica asociada a *Candida*, una afección inflamatoria crónica de etiología multifactorial que es común entre los usuarios de prótesis. Esta condición resulta especialmente difícil de tratar debido a la desinfección incompleta de la superficie acrílica y a la rápida recolonización microbiana. (Woźniak-Budych y otros, 2023)

Además, las resinas acrílicas convencionales tienen ciertas propiedades que contribuyen a su vulnerabilidad en el entorno bucal, tales como la porosidad, la carga superficial, la cantidad de radicales libres en la superficie, la hidrofobicidad y la rugosidad. Estas características facilitan la colonización microbiana, aumentando el riesgo de infecciones en los portadores de prótesis. (Salgado y otros, Antimicrobial Activity of a 3D-Printed Polymethylmethacrylate Dental Resin Enhanced with Graphene, 2022)

A pesar de estas desventajas, el PMMA sigue siendo la opción preferida por los odontólogos para diversas aplicaciones en prótesis, incluyendo bases de prótesis, dientes artificiales, coronas temporales, obturadores para paladares hendidos, así como revestimiento y reparación de prótesis. (Salgado y otros, Antimicrobial Activity of a 3D-Printed Polymethylmethacrylate Dental Resin Enhanced with Graphene, 2022)

4.1.2.2. Beneficios del grafeno

La principal limitación del PMMA en prótesis dentales es su tendencia a fracturarse debido a la absorción de agua y su baja resistencia tanto al impacto como a la flexión. No obstante, la adición de nano rellenos ha demostrado mejorar significativamente sus características, aumentando la resistencia transversal, la compatibilidad biológica y la dureza superficial, además de reducir la absorción y solubilidad del agua. (Tejas y otros, 2021)

En particular, el uso de grafeno ha mostrado cambios importantes en el comportamiento del material. Al incrementar su ductilidad, el PMMA reforzado con grafeno es capaz de soportar mayor deformación antes de fracturarse, lo que lo hace más resistente y duradero. Esta propiedad de ductilidad, que permite al material absorber más energía antes de romperse, es especialmente valiosa en el diseño de prótesis. (Salgado y otros, 2022)

Además, la integración de nano fibras de grafeno en el PMMA ha mejorado no solo sus cualidades mecánicas, sino también su actividad antimicrobiana. Estas mejoras hacen del PMMA reforzado con grafeno un material ideal para su uso en aplicaciones CAD/CAM, ofreciendo mayor resistencia y propiedades antibacterianas con mínimos efectos citotóxicos.

(Apostu A. y otros, 2023) (Selva-Otaolaurruchi y otros, 2023)

La Tabla 4 presenta un resumen de diversos estudios experimentales revisados. A través de esta tabla, se pueden apreciar las mejoras significativas en las propiedades mecánicas y antibacterianas logradas mediante la adición de grafeno a los materiales analizados. Estas mejoras destacan el potencial del grafeno como un aditivo eficaz y abren nuevas oportunidades para el desarrollo de materiales más robustos y funcionales en diversas aplicaciones. Su incorporación influye positivamente en el rendimiento, contribuyendo a la resistencia, durabilidad y capacidades antimicrobianas de los materiales.

Tabla 4

Estudios que evaluaron la eficiencia del grafeno

Título y autor	Objetivo		Resultados
Influencia del grafeno en la mejora de las propiedades físico-mecánicas de las resinas de base para prótesis dentales de PMMA Bacali et al. (Bacali y otros, The Influence of Graphene in Improvement of Physico-Mechanical Properties in PMMA Denture Base Resins, 2019)	Caracterizar los nuevos compuestos obtenidos mediante la incorporación de diferentes proporciones de Gr-Ag en una resina PMMA auto polimerizada comercial.	Se incorporaron dos concentraciones de Gr-Ag (1 % y 2 % en peso) en el PMMA para evaluar su caracterización mecánica, analizando el comportamiento bajo compresión, resistencia a la flexión y a la tracción. Además, se utilizó microscopía óptica con luz polarizada y microscopía electrónica de barrido para analizar el relleno.	La adición de Gr-Ag mejoró las propiedades mecánicas, aumentando significativamente la flexibilidad, con un 1% de Gr-Ag incrementando el módulo de ruptura en un 17,4%. Sin embargo, un 2% de Gr-Ag redujo la absorción de agua, lo que disminuye el riesgo de degradación.
Asociación de polimetilmetacrilato de plata y grafeno (PMMA) con terapia fotodinámica	Evaluar la efectividad de inactivar bacterias relacionadas con la halitosis en usuarios de	Se añadieron nanopartículas de grafeno dopadas con plata al 1% y 2% en peso a resina acrílica, formando tres grupos: uno sin tratamiento de luz y dos expuestos a luz	La incorporación de nanopartículas de plata y grafeno en resinas acrílicas de PMMA mostró un significativo efecto antimicrobiano contra bacterias causantes

<p>para la inactivación de bacterias responsables de la halitosis en usuarios de prótesis dentales</p> <p>Bacali et al. (Bacali y otros, Association of Graphene Silver Polymethyl Methacrylate (PMMA) with Photodynamic Therapy for Inactivation of Halitosis Responsible Bacteria in Denture Wearers, 2021)</p>	<p>prótesis acrílicas mediante el uso de resina de polimetilmetacrilato enriquecida con nanopartículas de grafeno plateado, así como el impacto de la combinación de esta resina con terapia fotodinámica extraoral.</p>	<p>roja tras aplicar un fotosensibilizador. Las muestras fueron incubadas con <i>Porphyromonas gingivalis</i> y <i>Enterococcus faecalis</i>.</p>	<p>de halitosis, especialmente <i>Porphyromonas gingivalis</i>. Al aplicar un agente fotosensibilizador y luz láser, las concentraciones más altas de nanopartículas (2% en peso) lograron una mayor inhibición bacteriana en usuarios de prótesis acrílicas.</p>
<p>Análisis de la resistencia a la fractura de materiales protésicos fijos provisionales CAD/CAM: PMMA,</p>	<p>Evaluar y comparar la resistencia a la fractura de restauraciones temporales elaboradas con polimetilmetacrilato (PMMA), PMMA</p>	<p>Se formaron cuatro grupos de diez muestras por material, caracterizadas mediante pruebas de compresión en una máquina de ensayo universal. Se registró la carga hasta la fractura en Newtons (N) mediante</p>	<p>Se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la resistencia entre el PMMA (1302,71 N) y los otros materiales analizados: GRA (1990,02 N), RA (1796,20 N) y PS (2234,97 N). El PMMA mostró valores considerablemente más bajos,</p>

<p>grafeno, resina de acetal y polisulfona</p> <p>Abad-Coronel et al. (Abad-Coronel y otros, 2023)</p>	<p>modificado con grafeno (GRA), resina acetálica (AR) y polisulfona (PS) mediante fresado en un sistema CAD/CAM, para una prótesis dental fija de tres unidades (FDP).</p>	<p>software, y el modo de fractura se examinó con un estereomicroscopio.</p>	<p>mientras que el PS presentó el más alto. GRA y RA también superaron al PMMA. En conclusión, GRA, RA y PS son alternativas viables a considerar en el grupo de materiales restauradores fresados provisionales.</p>
<p>Polimetilmetacrilato dopado con grafeno (PMMA) como nuevo material restaurador en prótesis implantosoportadas: análisis in vitro de la resistencia a la fatiga mecánica</p> <p>Selva-Otaolaurruchi et al. (Selva-Otaolaurruchi y otros, 2023)</p>	<p>Analizar la resistencia a la fractura de estructuras protésicas tipo cantilever elaboradas con resinas de polimetilmetacrilato (PMMA) modificadas con grafeno y fabricadas mediante tecnología CAD-CAM.</p>	<p>Se desarrolló un modelo maestro con cuatro implantes de 4 mm de diámetro, separados por 3 mm, sobre el cual se colocaron 44 prótesis parciales fijas de tres unidades con un cantilever de 11 mm, cementadas en pilares de titanio con cemento de resina de curado dual. De las 44 prótesis, 22 fueron de PMMA y 22 de PMMA modificado con nanopartículas de óxido de grafeno (PMMA-G). Todas las muestras se probaron en un simulador de masticación, aplicando una carga de 80 N hasta la fractura o hasta 240,000 ciclos de carga.</p>	<p>El número promedio de aplicaciones de carga requeridas para que la restauración temporal alcanzara la fractura fue de 155,455 en el grupo PMMA-G, en comparación con 51,136 en el grupo PMMA.</p>

<p>Actividad antimicrobiana de un polimetilmetacrilato impreso en 3D resina dental mejorada con grafeno</p> <p>Salgado et al. (Salgado y otros, Antimicrobial Activity of a 3D-Printed Polymethylmethacrylate Dental Resin Enhanced with Graphene, 2022)</p>	<p>Evaluar, de manera in vitro, la actividad antimicrobiana de una resina dental de polimetilmetacrilato impresa en 3D, enriquecida con grafeno, frente a <i>Candida albicans</i> y <i>Streptococcus mutans</i>, así como su rugosidad superficial.</p>	<p>Se desarrolló una resina dental de polimetilmetacrilato impresa en 3D, reforzada con cuatro concentraciones de grafeno (0,01 %, 0,1 %, 0,25 % y 0,5 % en peso), utilizando resina pura como control. Las muestras se fabricaron con una impresora de pantalla de cristal líquido, empleando discos para evaluar la actividad antimicrobiana y barras para medir la rugosidad superficial. El análisis antimicrobiano se enfocó en la inhibición del crecimiento de <i>Candida albicans</i> y <i>Streptococcus mutans</i>, así como en su adhesión a la superficie de la resina.</p>	<p>A medida que aumentó la concentración de grafeno, la rugosidad superficial de la resina se incrementó. Tras 24 horas, se observó inhibición del crecimiento de <i>Candida albicans</i>, sin recuperación después de 48 horas. Además, las muestras con grafeno inactivaron <i>Streptococcus mutans</i> tras 48 horas, y la densidad de biopelículas microbianas disminuyó en dichas muestras.</p>
<p>Propiedades mecánicas y superficiales de una resina dental impresa en 3D reforzada con grafeno</p> <p>Salgado et al. (Salgado y otros, Mechanical and</p>	<p>Evaluar in vitro el impacto de incorporar nanopartículas de grafeno en una resina dental de polimetilmetacrilato impresa en 3D, analizando específicamente la</p>	<p>Se cargó una resina dental impresa en 3D (Dental Sand, Harz Lab) con nanoplaquetas de grafeno en concentraciones del 0,01 %, 0,1 %, 0,25 % y 0,5 %, usando resina pura como control. Se midió la rugosidad con un perfilómetro, se evaluó la resistencia a la flexión en una prueba de tres puntos y se</p>	<p>La adición de grafeno al PMMA impreso en 3D aumentó su dureza a una concentración del 0,01 % en peso, con significancia estadística. Sin embargo, la rugosidad superficial y la disminución de las propiedades de flexión fueron significativas cuando la concentración de grafeno superó</p>

surface properties of a 3D-printed, 2023)	rugosidad superficial, las propiedades de flexión y la dureza.	determinó la dureza Shore D con un durómetro.	el 0,01 %, especialmente en concentraciones de 0,25 % y 0,5 %.
El efecto del termociclador sobre la micro dureza superficial del PMMA dopado con grafeno: un estudio experimental in vitro Hernández et al. (José Antonio y otros, 2020)	Evaluar el efecto del termociclado en la microdureza superficial del poli(metilmecrilato) (PMMA) dopado con grafeno, mediante un estudio experimental in vitro.	Se prepararon 96 discos de G-CAM, tanto monocromáticos (G-MONO) como multicromáticos (G-MULTI), distribuidos en cuatro grupos de 24 muestras. Los grupos 1 (G-MONOC) y 2 (G-MULTIc) sirvieron como controles sin termociclado, mientras que los grupos 3 (G-MONOt) y 4 (G-MULTIt) fueron sometidos a este proceso. Se utilizaron un durómetro digital Shore A para las mediciones.	Los resultados mostraron similitudes entre el G-MONO termociclado y no termociclado, sin diferencias significativas en el ANOVA unidireccional ni en las pruebas Tukey pareadas ($\alpha < 0,05$) entre los grupos comparados. El PMMA CAD/CAM dopado con grafeno mantuvo con éxito su microdureza superficial tras 10,000 ciclos de termociclado.
Efecto de las nanopartículas de óxido de grafeno en la resistencia a la flexión de todas las cerámicas: un estudio in vitro	Determinar si se produce un incremento en la resistencia a la flexión de todas las cerámicas que contienen nanopartículas de grafeno.	Se tomaron 20 muestras cerámicas de 20×5×3 mm, clasificadas en dos grupos: A (control, sin óxido de grafeno) y B (con GO). Se siguió la especificación 69 de 1991 de la ADA para evaluar la resistencia a la flexión, aplicando una carga central a 0,5 mm/min en un tramo de 15 mm con una máquina de ensayo universal. La resistencia	Se observó una diferencia significativa en la resistencia media a la flexión entre los grupos ($p = 0,001$). El grupo B, que contenía grafeno, alcanzó la mayor resistencia media a la flexión con 562,61 MPa, mientras que el grupo A (control) presentó la más baja, con 458,61 MPa.

Yogitha et al. (K. y otros, 2023)		a la flexión se comparó mediante la prueba U de Mann Whitney.	
Investigación experimental sobre el comportamiento tribomecánico del PMMA reforzado con lubricante sólido para aplicaciones en implantes dentales Abdo et al. (Abdo y otros, 2024)	Mejorar el comportamiento mecánico y tribológico de compuestos de polimetilmetacrilato (PMMA) reforzados con óxido de grafeno (GO), utilizando este último como relleno lubricante sólido para aplicaciones biomédicas avanzadas.	Se elaboraron compuestos de PMMA/GO con diferentes proporciones de peso de GO (0, 0.2, 0.5, 0.7 y 1 %) para evaluar su impacto en el rendimiento del material.	La adición de óxido de grafeno (GO) al PMMA mejoró significativamente sus propiedades, aumentando la resistencia a la tracción en un 14,1% (27,59 MPa) y reduciendo el coeficiente de fricción en un 73,33%. Además, se redujeron las tasas de desgaste en un 46,43% en comparación con el PMMA puro. Los compuestos con un 1% en peso de GO mostraron las mejores mejoras tanto en propiedades mecánicas como tribológicas.
Optimización dimensional de grafeno modificado Material de poli metacrilato de metilo utilizado como material de broche para prótesis parciales removibles estéticas	Evaluar la dimensión óptima del polimetilmetacrilato modificado con grafeno, con el fin de determinar su viabilidad como material de cierre para prótesis dentales parciales	Se llevó a cabo un análisis de elementos finitos en 54 modelos 3D de broches, evaluando desplazamientos de 0,25–0,5 mm a 3 mm de la punta. Los broches se clasificaron en tres dimensiones (A, B y C) y seis conicidades (0,5–1). Se registraron la fuerza de reacción (N) y la tensión principal máxima (MPa), validando los resultados	Los mejores resultados de fuerza de retención se observaron en los subgrupos C3 (conicidad 0,6), C3 (conicidad 0,8) y B3 (conicidad 1), teniendo en cuenta también la estética. El grupo C registró los valores más altos de tensión principal máxima, seguidos por el grupo B y luego el grupo A. Se identificaron correlaciones positivas entre el

<p>Hussein (Hussein, Dimensional Optimization of Graphene-Modified Polymethyl Methacrylate Material Used as an Aesthetic Removable Partial Denture Clasp Material, 2023)</p>		<p>con pruebas mecánicas. Las correlaciones entre ancho, espesor, fuerza de reacción y tensión principal máxima fueron analizadas estadísticamente, aplicando pruebas de correlación de Spearman y Pearson según la distribución de los datos.</p>	<p>grosor y el ancho de los broches con la fuerza de retención y la tensión principal máxima: el coeficiente de correlación para el grosor y la fuerza de retención fue de 0,699, mientras que el del ancho fue de 0,621. En cuanto a la tensión principal máxima, el grosor tuvo una correlación de 0,899 y el ancho de 0,740. El material analizado es adecuado como broche estético, destacando que tanto el grosor como el ancho influyen positivamente en la fuerza de retención, siendo el grosor el factor más significativo.</p>
<p>Mejora de la vida útil de la prótesis parcial removible fabricada por Biomateriales reforzados con nano placas de grafeno e Hidroxiapatita con ayuda de redes neuronales artificiales</p>	<p>Modificar la resistencia a la fatiga y la durabilidad mediante el refuerzo con nanomateriales en bajas fracciones de volumen.</p>	<p>Se utilizaron nanomateriales GNP (nanoplacas de grafeno) y HAP (hidroxiapatita) en fracciones de peso de 0,25 a 1,25% para modificar las propiedades dinámicas de biomateriales. Se llevaron a cabo un trabajo experimental, que incluyó la fabricación de muestras para pruebas de fatiga, y un enfoque mediante redes</p>	<p>La discrepancia entre los resultados experimentales y los obtenidos con la red neuronal artificial (ANN) fue mínima, no superando el 0,64%. Además, el uso de nanomateriales como refuerzo incrementó la resistencia a la fatiga y la vida útil en aproximadamente un 28%. La modificación de la fatiga con nano placas de grafeno</p>

<p>Muhannad et al. (Muhannad y otros, 2020)</p>		<p>neuronales artificiales (ANN) para estimar la vida útil a fatiga. Ambos métodos permitieron evaluar la resistencia a la fatiga considerando la variación de los nanomateriales y sus fracciones de volumen, comparando los resultados obtenidos.</p>	<p>(GNP) superó a la realizada con hidroxiapatita (HAP), con un aumento aproximado del 6%.</p>
<p>Propiedades físicas-mecánicas-biológicas del poli (metilmetacrilato) enriquecido con óxido de grafeno como potencial biomaterial</p> <p>García-Contreras et al. (García-Contreras y otros, 2021)</p>	<p>Evaluar la citotoxicidad y el impacto del óxido de grafeno (GO) en la proliferación de fibroblastos gingivales, células pulpo-dentales y osteoblastos humanos en cultivo, así como analizar las propiedades físicas, mecánicas y biológicas del poli(metilmetacrilato) (PMMA) modificado con GO.</p>	<p>La caracterización del óxido de grafeno (GO) se llevó a cabo mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). La citotoxicidad y la proliferación celular se evaluaron utilizando el bioensayo MTT. Las pruebas físico-mecánicas, que incluyeron resistencia a la flexión y módulo elástico, se realizaron con una máquina de ensayos universal. La sorción y solubilidad se determinaron pesando las muestras antes y después del secado e inmersión en agua. La porosidad se evaluó a través de inspección visual.</p>	<p>El óxido de grafeno (GO) presentó una morfología heterogénea con un tamaño de partícula de $66,67 \pm 64,76 \mu\text{m}$ y mostró una citotoxicidad leve, manteniendo una viabilidad celular del 50 al 75% entre 1 y 30 días. Tras 24 horas de incubación con polimetilmetacrilato (PMMA), se observó una estimulación significativa de los osteoblastos ($45 \pm 8\%$, $p < 0,01$). Las propiedades físicas y mecánicas del PMMA con GO mejoraron considerablemente, sin afectar su sorción, solubilidad ni porosidad. Tanto el GO solo como combinado con PMMA mostraron buena biocompatibilidad</p>

			y favorecieron la proliferación celular y la regeneración de tejidos.
<p>Evaluación de la resistencia a la flexión y del módulo elástico de estructuras fabricadas mediante métodos convencionales. PMMA y PMMA reforzado con grafeno</p> <p>Di Carlo et al. (DI CARLO y otros, 2020)</p>	<p>Comparar el módulo elástico y la resistencia a la flexión del polimetacrilato (PMMA) y el polimetacrilato modificado con grafeno (G-PMMA)</p>	<p>Se prepararon 40 muestras divididas en dos grupos de 20: PMMA convencional y PMMA reforzado con grafeno. Las muestras, con dimensiones de 62 mm de largo, 10 mm de ancho y 2,5 mm de grosor se fabricaron siguiendo la Especificación N°12 de la ADA, utilizando técnicas CAD/CAM mediante fresado. Para la prueba de flexión, se aplicó una carga en una máquina de ensayo universal a una velocidad de 1,0 mm/min hasta provocar la fractura, registrando los datos para su análisis posterior con un microscopio electrónico de barrido.</p>	<p>En comparación con las muestras de PMMA, las de G-PMMA presentaron valores significativamente superiores en resistencia a la flexión (FS) y en el módulo de elasticidad (EM). El análisis de imágenes realizado con SEM reveló que la morfología de fractura en las muestras de G-PMMA era heterogénea.</p>
<p>Una comparación del efecto de diferentes formas de Grafeno y polivinilpirrolidona para</p>	<p>Comparar los efectos de las formas en polvo, de esterilla y de lámina de grafeno, así como la polivinilpirrolidona (PVP),</p>	<p>Se fabricaron muestras para pruebas de fatiga, que fueron sometidas a ensayos para evaluar su resistencia en función de diversos parámetros de nanomateriales. Luego, se empleó la técnica de redes neuronales</p>	<p>Se encontraron diferencias significativas, destacando que las láminas de grafeno y las esteras de PVP mejoraron la resistencia a la flexión, alcanzando valores de 118,51 MPa y 115,85 MPa, respectivamente, frente a</p>

<p>reforzar físicamente el PMMA</p> <p>Mutluay (Mutluay, 2022)</p>	<p>en la resistencia a la flexión del polimetilmetacrilato (PMMA).</p>	<p>artificiales (ANN) para calcular la vida útil a fatiga de las muestras, comparando estos resultados con los obtenidos en los ensayos.</p>	<p>108,24 MPa en el grupo control. Los resultados indican que estas formas de refuerzo son preferibles para prótesis dentales clínicas</p>
<p>Efecto de los nanocompositos de óxido de zinc/óxido de grafeno sobre la citotoxicidad, las propiedades antibacterianas mecánicas del polimetilmetacrilato</p> <p>Shaofan et al. (Ruan y otros, 2024)</p>	<p>Mejorar las propiedades antibacterianas del polimetilmetacrilato (PMMA) para prevenir infecciones tras procedimientos dentales.</p>	<p>Se desarrollaron nanocompuestos de óxido de zinc/óxido de grafeno (ZnO/GO) mediante síntesis de un solo paso y se caracterizaron con técnicas como TEM, EDS, FTIR y XRD. Se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas del PMMA modificado con estos nanocompuestos a través de pruebas de absorción, solubilidad en agua, ángulo de contacto, ensayos de flexión en tres puntos y pruebas de compresión. También se examinaron las propiedades biológicas del PMMA modificado mediante recuento de colonias, tinción con violeta de cristal y ensayo CCK-8.</p>	<p>Con una concentración del 0,2 % de nanocompuestos en el PMMA, se logró un aumento del 23,4 % en la resistencia a la flexión y del 31,1 % en la resistencia a la compresión, así como una disminución del 60,33 % en el número de colonias bacterianas. Además, el envejecimiento de la resina no afectó sus propiedades antibacterianas, y las pruebas CCK-8 confirmaron que el PMMA modificado no presentaba citotoxicidad.</p>

<p>Compuestos de grafeno con aplicaciones dentales y biomédicas</p> <p>Malik et al. (Malik y otros, 2018)</p>	<p>Evaluar la incorporación de grafeno en un implante dental convencional de polímero para desarrollar un material compuesto con propiedades mecánicas mejoradas.</p>	<p>Se desarrolló un método eficiente para producir grandes volúmenes de grafeno en láminas delgadas (FLG) a partir de grafeno multicapa (MLG) comercial. Este FLG se utilizó para crear compuestos de polímero dental con propiedades mejoradas.</p>	<p>Los compuestos de polímero dental dopados con FLG mostraron que concentraciones bajas (aproximadamente 0,2 % en peso) mejoraron significativamente las propiedades fisicomecánicas, con un aumento del 27 % en la resistencia a la compresión y del 22 % en el módulo de compresión.</p>
<p>Efectos del compuesto de nanopartículas de plata/óxido de grafeno sobre las propiedades del material base de polimetilmetacrilato in vitro</p> <p>Tang et al. (Tang y otros, 2023)</p>	<p>Sintetizar compuestos de nanopartículas de plata y óxido de grafeno (AgNPs/GO) utilizando el método de reducción química, que luego se combinó con PMMA a través de un proceso de molienda de bolas para mejorar las propiedades antibacterianas del PMMA.</p>	<p>Se preparó un compuesto AgNPs/GO/PMMA utilizando 0,5 mg/ml de óxido de grafeno (GO) y nitrato de plata a través de un método de reducción química. Las nanopartículas se incorporaron en polvo de PMMA mediante un molino de bolas y se curaron a 60 °C. Se cultivaron células madre mesenquimales gingivales (HGMSC) y se evaluó su citotoxicidad usando el ensayo CCK-8. La actividad antibacteriana se determinó mediante un ensayo de adhesión de película con <i>S. mutans</i>. Finalmente, se</p>	<p>El compuesto modificado AgNP/GO/PMMA exhibió propiedades antibacterianas mejoradas contra <i>Streptococcus mutans</i>, evidenciadas por la reducción en el número de bacterias y cambios en su morfología con el aumento de la fracción de masa del compuesto. Las pruebas de fricción y el ángulo de contacto confirmaron mejoras en las propiedades mecánicas. Además, el compuesto no mostró citotoxicidad en células madre mesenquimatosas gingivales humanas, sugiriendo su seguridad para aplicaciones</p>

		evaluaron las propiedades de fricción y se midió el ángulo de contacto de las muestras.	biomédicas. Con una fracción de masa de 0,3 % de AgNPs/GO, se logró un efecto antibacteriano efectivo sin citotoxicidad, además de una excelente capacidad tribológica y buena hidrofiliidad superficial.
Efectos de la adición de grafeno en las propiedades mecánicas de composites para restauración dental Sava et al. (Sava y otros, 2015)	Evaluar y examinar las propiedades mecánicas de diferentes materiales compuestos, tanto con grafeno como sin él, en comparación con el composite comercial Herculite, destinados a restauraciones dentales.	Se prepararon materiales compuestos a partir de una mezcla de monómeros fotopolimerizables (Bis-GMA y TEGDMA) con rellenos como hidroxiapatita, grafeno, biovidrios y sílice coloidal. Se fabricaron diez muestras de diferentes composites para evaluar su resistencia a la flexión, módulo de Young, resistencia a la tracción diametral y resistencia a la compresión, utilizando un dispositivo Lloyd Instruments LR5k Plus.	La adición de un 5-10 % en peso de hidroxiapatita con nanopartículas de grafeno en mezclas de monómeros sin relleno aumenta el módulo de Young, la dureza superficial y la resistencia a la flexión del material.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

4.1.2.3. Limitaciones del uso de grafeno

Aunque el grafeno presenta numerosos beneficios en propiedades físicas, mecánicas y antibacterianas, también tiene ciertas limitaciones que deben considerarse. (De Angelis y otros, *In Vitro Mechanical Properties of a Novel Graphene-Reinforced*, 2023)

Propiedades variables

Si bien el grafeno es conocido por su alta resistencia mecánica, su comportamiento puede variar considerablemente dependiendo de cómo se integre con otros materiales. Esta variabilidad puede resultar en una falta de uniformidad en las propiedades mecánicas, afectando la durabilidad de las restauraciones dentales. En la evaluación de las propiedades mecánicas del PMMA reforzado con grafeno (G-PMMA), se observó que, aunque hubo una mejora en la resistencia a la compresión, el módulo de flexión fue notablemente inferior al del bis-acrílico dental convencional. (De Angelis y otros, *In Vitro Mechanical Properties of a Novel Graphene-Reinforced*, 2023) Esto sugiere que la incorporación de grafeno no siempre garantiza una mejora significativa en las propiedades mecánicas. Además, al comparar el G-PMMA con resinas impresas en 3D, se evidenció un rendimiento deficiente en resistencia a la flexión, lo que resalta la dificultad de competir con materiales tradicionales. (De Angelis y otros, *Flexural Properties of Three Novel 3D-Printed Dental Resins*, 2024)

En estudios de biocompatibilidad, aunque el PMMA-G mostró una mejor humectación, no se encontraron diferencias significativas en la viabilidad celular, limitando su potencial en aplicaciones que requieren tanto resistencia como biocompatibilidad. (Serrano-Belmonte y otros, 2024) La evaluación de polímeros a base de grafeno en combinación con PEEK reveló que PEEK ofrece un rendimiento mecánico superior, mientras que el grafeno no alcanzó los niveles de fuerza de retención necesarios para aplicaciones prácticas. En el análisis biomecánico de prótesis parciales, se observó que las tensiones en el PMMA-G eran más altas, pero su capacidad para soportar deformaciones fue inferior a la de PEEK. (Hussein, *Biomechanical Performance of PEEK and Graphene-Modified PMMA as Telescopic Removable Partial Denture Materials: A Nonlinear 3D Finite Element Analysis*, 2022) Finalmente, aunque el G-PMMA presentó una menor tasa de desgaste, no se lograron diferencias significativas en dureza, lo que subraya que, a pesar de algunas mejoras en ciertas propiedades, el grafeno todavía enfrenta limitaciones en su aplicación en materiales dentales que requieren alta durabilidad y resistencia. (Hussein, *Biomechanical Performance of PEEK*

and Graphene-Modified PMMA as Telescopic Removable Partial Denture Materials: A Nonlinear 3D Finite Element Analysis, 2022)

4.1.3. Prótesis con mayor impacto clínico

El sector odontológico y prostético se encuentra en constante evolución, incorporando nuevos materiales y métodos de fabricación que optimizan la funcionalidad y estética de las prótesis. Sin embargo, esta evolución está condicionada por estrictos criterios físicos, biológicos y de compatibilidad, lo que limita el uso de ciertos materiales. (García-Contreras y otros, 2021)

Tal como se evidenció en la Tabla 4, diversas investigaciones han demostrado que la adición de grafeno y sus derivados no solo mejora las propiedades físicas y mecánicas de las prótesis, sino que también optimiza sus características químicas y biológicas, superando las limitaciones de los materiales convencionales.

Aunque actualmente existen pocos estudios que investiguen estas mejoras en prótesis dentales, investigaciones recientes, como el estudio de Ortensi et al., se centran en las prótesis fijas, mostrando resultados alentadores en la resistencia a la fractura. En su estudio in vitro sobre la resistencia a la fractura de prótesis parciales fijas de tres unidades, se identificaron diferencias significativas entre materiales tradicionales y novedosos, con paneles de fibra de vidrio de metal-cerámica (MCR) y PMMA dopado con grafeno exhibiendo mayor resistencia a la fractura y menor elongación a la rotura en comparación con el PMMA convencional, además de una mejor resistencia al envejecimiento. (Ortensi y otros, 2024) Otro estudio analizó el efecto del termociclado en la resistencia a la flexión y la microdureza de materiales de base para prótesis dentales fabricadas mediante CAD-CAM, revelando que el tipo de material influye significativamente en la resistencia a la flexión, siendo el G-CAM el más resistente. (Gülce y otros, 2022) Las notables propiedades mecánicas del G-CAM lo posicionan como un material con gran potencial para su aplicación en la práctica convencional. (Novalbos, s.f.)

Estos resultados sugieren que las prótesis fijas fabricadas con materiales innovadores como el PMMA dopado con grafeno podrían tener un impacto clínico al ofrecer mayor durabilidad y resistencia a la fractura.

4.1.3.1. Evidencia clínica

La aplicación de nuevos materiales en prostodoncia, como el grafeno, requiere una validación clínica que respalde los beneficios teóricos previamente identificados. Aunque el

grafeno ha demostrado tener propiedades excepcionales en términos de resistencia, biocompatibilidad y efectos antimicrobianos en estudios preclínicos, es fundamental evaluar su desempeño en escenarios reales para corroborar su eficacia en pacientes.

En esta sección, se presentan dos informes clínicos que demuestran la implementación del grafeno en prótesis dentales fijas. Estos casos permiten identificar cómo las propiedades del grafeno, que pueden mejorar la durabilidad y el confort, favorecen a los pacientes que requieren este tipo de prótesis. (Goud & Vaish, 2023) (Azevedo y otros, 2019)

- **Informe clínico 1**

Un paciente masculino de 76 años acudió al departamento ambulatorio con el motivo principal de prótesis maxilar mal ajustada. El paciente, tras utilizar una prótesis maxilar durante 8 meses, experimentó un desplazamiento recurrente en las últimas semanas. (Goud & Vaish, 2023)

Se decidió optar por el protocolo All-on-4, dado que el paciente presentaba buena cantidad de hueso en la región anterior del maxilar, lo que permitió la colocación de implantes. (Goud & Vaish, 2023)

Visita 1: Cirugía de implantes

Se colocaron implantes en el maxilar anterior bajo anestesia local, con un protocolo sin colgajo. Se logró una buena estabilidad primaria de los implantes y se utilizó escaneo intraoral para diseñar la prótesis temporal. (Goud & Vaish, 2023)

Visita 2: Prueba de prótesis

Se diseñó y fresó una prótesis de prueba en polimetilmetacrilato (PMMA). Tras una semana de uso, el paciente reportó comodidad y satisfacción. (Goud & Vaish, 2023)

Visita 3: Colocación de prótesis definitiva

La prótesis definitiva fue fresada en PMMA reforzado con grafeno, lo que ofreció mejoras significativas en términos de resistencia y ligereza. El grafeno, integrado en el material, proporcionó mayor durabilidad y propiedades biocompatibles. El paciente quedó satisfecho con la estética y funcionalidad de la prótesis. (Goud & Vaish, 2023)

Seguimiento

Se programó una cita de seguimiento electivo para el paciente a los 2 meses; el paciente sigue utilizando su prótesis sin presentar dificultades en su funcionamiento y se muestra satisfecho con la apariencia estética. (Goud & Vaish, 2023)

Figura 12

(a) Prótesis definitiva. (b) Prótesis extraoral postoperatoria



Fuente: Goud y Vaish, 2023. (Goud & Vaish, 2023)

• Informe clínico 2

Una paciente femenina de 75 años acudió a la Clínica Dental de la Facultad de Odontología de la Universidad Complutense de Madrid en busca de un tratamiento restaurador debido a problemas funcionales y estéticos. Entre sus antecedentes médicos, destacaba un cáncer de pulmón superado diez años antes. (Azevedo y otros, 2019)

Evaluación diagnóstica

El diagnóstico incluyó un examen clínico, imágenes intraorales, radiografías y evaluación de modelos. El examen intraoral mostró dos prótesis parciales fijas maxilares de tres unidades, soportadas por el primer premolar y el primer molar en el primer cuadrante, y por el canino y el segundo premolar en el segundo cuadrante, debido a la agenesia de los incisivos laterales superiores. También se observaron extensas restauraciones de amalgama en el segundo molar derecho y el primer molar izquierdo, comprometidas por caries radiculares avanzadas y problemas de furcación. (Azevedo y otros, 2019)

Plan de tratamiento

Debido a la severidad de las lesiones, se decidió extraer los molares comprometidos y restaurar los dientes restantes con una prótesis fija para mejorar la dimensión vertical y reemplazar las piezas ausentes. No se colocaron implantes en la arcada inferior por razones oclusales. Se utilizó la técnica de preparación vertical biológicamente orientada (BOPT) sin líneas de acabado para todas las preparaciones dentales. (Azevedo y otros, 2019)

Procedimiento clínico

El tratamiento comenzó con raspado y alisado radicular, seguido de la extracción del segundo molar superior derecho y el primer molar superior izquierdo. Tras un mes de cicatrización, se realizó una impresión preliminar con un escáner intraoral (Trios, 3shape) para diseñar una prótesis provisional en polimetilmetacrilato (PMMA), que fue impresa en 3D. Durante esta fase, se retiraron las restauraciones metal-cerámicas y se realizó un doble sondaje para determinar los márgenes de preparación. La prótesis provisional en PMMA se cementó temporalmente con Temp Bond Clear (Kerr), utilizando composite en la zona intrasulcular para mejorar el perfil de emergencia y promover la reinserción gingival. (Azevedo y otros, 2019)

Prótesis definitiva

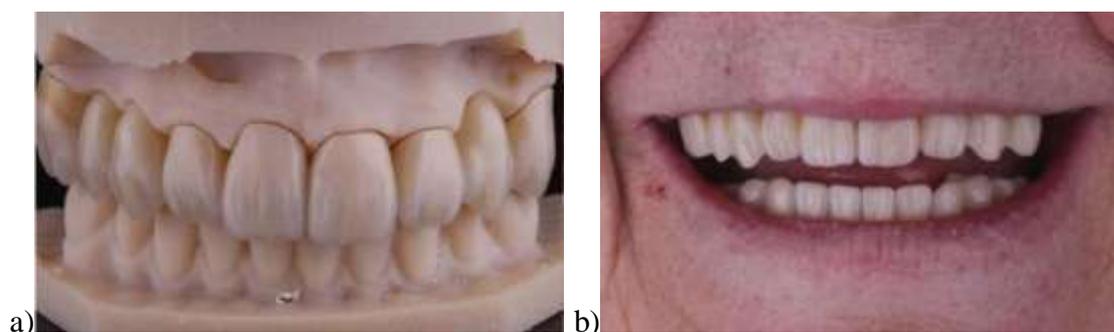
Tras tres meses de uso de la prótesis provisional y ajustes en el perfil de emergencia, se tomó una impresión definitiva con un escáner intraoral (Medit i500, Medit) y un escaneo facial 3D (AFT System One, AFT Dental System) para evaluar los parámetros estéticos. La prótesis definitiva fue diseñada y fresada en PMMA reforzado con óxido de grafeno mediante el software Exocad (exocad GmbH), y se verificaron el ajuste pasivo, contactos interproximales y oclusión. Una vez confirmados los parámetros, la prótesis se cementó con un cemento de resina de polimerización dual (Variolink Esthetic DC, Ivoclar Vivadent) y se fotopolimerizó. (Azevedo y otros, 2019)

Seguimiento

Se realizaron controles de seguimiento a la semana, y a los 1, 3 y 8 meses posteriores a la colocación de la prótesis definitiva. No se reportaron complicaciones mecánicas, estéticas ni biológicas. Los tejidos blandos mostraron una excelente salud y estabilidad. (Azevedo y otros, 2019)

Figura 13

a) Prótesis dental fija de PMMA reforzado con grafeno. b) Vista extraoral de la sonrisa postratamiento



Fuente: Azevedo et al. 2019. (Azevedo y otros, 2019)

4.2. Discusión

Tras una revisión sistemática de 65 artículos, se destacó el grafeno como un material de gran potencial en la prostodoncia. Este material se alinea con los requisitos esenciales de los materiales restaurativos provisionales en odontología, como la protección pulpar, el mantenimiento de la estabilidad oclusal y la estética. Las propiedades del grafeno, caracterizadas por su resistencia mecánica, actividad antimicrobiana y biocompatibilidad, lo posicionan como una opción prometedora para aplicaciones dentales. (Chávez, 2022)

En particular, sus propiedades mecánicas, como su alta resistencia a la tracción y a la flexión, lo posicionan como un material idóneo para prótesis dentales que deben soportar las condiciones extremas de la cavidad oral, incluidas las fuerzas masticatorias y el ambiente húmedo y bacteriano. (Chávez, 2022)

Este potencial ha sido validado por diversos estudios. Por ejemplo, Selva et al. demostraron que el PMMA dopado con grafeno triplicó la resistencia a la fractura del PMMA puro en restauraciones provisionales fabricadas con tecnología CAD-CAM y atornilladas sobre implantes con cantilevers. (Selva-Otaolaurruchi y otros, 2023) De manera similar, Abad-Coronel et al. confirmaron que el PMMA modificado con grafeno (GRA) mostró una resistencia significativamente superior en comparación con el PMMA, la resina de acetal (AR) y la polisulfona (PS). (Abad-Coronel y otros, 2023) Otros estudios también han demostrado que la adición de óxido de grafeno al PMMA mejora notablemente sus propiedades mecánicas y tribológicas, incrementando la resistencia a la tracción y reduciendo tanto el coeficiente de fricción como las tasas de desgaste. (Malik y otros, 2018) (Abdo y otros, 2024) (García-Contreras y otros, 2021) (José Antonio y otros, 2020)

En cuanto a la resistencia a la flexión, varios estudios respaldan las propiedades superiores del óxido de grafeno (GO). Se ha observado que los materiales con adición de GO, como el G-PMMA, presentan una mayor resistencia a la flexión en comparación con los grupos control sin grafeno. Esta mejora se refleja en un aumento significativo de la carga máxima y la rigidez a la flexión, lo que posiciona al G-PMMA como un material prometedor para su uso en prótesis dentales. (K. y otros, 2023) (DI CARLO y otros, 2020) (Mutluay, 2022) (SAVA y otros, 2015) Sin embargo, se ha señalado que se debe considerar que la resistencia a la flexión puede disminuir a medida que aumenta la concentración de grafeno en la resina. (Salgado y otros, Mechanical and surface properties of a 3D-printed, 2023)

Conservar estas propiedades mecánicas y tribológicas en las prótesis dentales no solo asegura su funcionalidad, sino que también extiende la vida útil de las restauraciones. Esto

resulta especialmente relevante para prótesis que enfrentan cargas repetitivas y condiciones adversas en la cavidad oral. (Vaidya y otros, 2024)

En cuanto a la actividad antimicrobiana, diversos estudios han confirmado la eficacia del grafeno en este ámbito. Por ejemplo, Salgado et al. encontraron que las muestras de resina PMMA con grafeno inhibieron el crecimiento de *Candida albicans* después de 24 horas y lograron inactivar *Streptococcus mutans* en un periodo de 48 horas, además de reducir la densidad de biopelículas microbianas. (Salgado y otros, Antimicrobial Activity of a 3D-Printed Polymethylmethacrylate Dental Resin Enhanced with Graphene, 2022) Por otro lado, Shaofan et al. reportaron una disminución del 60,33 % en el número de colonias bacterianas, lo que resalta aún más el potencial antimicrobiano del grafeno. (Ruan y otros, 2024)

En lo que concierne a la biocompatibilidad, aunque todavía se necesita realizar más investigaciones para comprender completamente esta propiedad, varios estudios han comenzado a arrojar resultados alentadores. (Woźniak-Budych y otros, 2023) Un ejemplo de esto es la investigación llevada a cabo por García-Contreras et al., quienes encontraron que tanto el óxido de grafeno (GO) solo como su combinación con PMMA mostraron niveles aceptables de biocompatibilidad. (García-Contreras y otros, 2021) Estos resultados indican que el grafeno podría ser no solo un material adecuado para aplicaciones dentales, sino también un agente que promueve la proliferación celular y la regeneración de tejidos. Este aspecto es crucial, ya que la biocompatibilidad es esencial para garantizar que las prótesis y restauraciones no solo sean funcionales desde el punto de vista mecánico, sino que también sean seguras y beneficiosas para el organismo. (Alemany, 2019)

Los informes clínicos obtenidos en este estudio corroboran las propiedades observadas in vitro, demostrando que las prótesis dentales fabricadas con grafeno funcionan eficazmente en un entorno in vivo. Los pacientes experimentaron un rendimiento óptimo de las prótesis y expresaron satisfacción con su apariencia estética, lo que es fundamental para la aceptación y uso prolongado de estos dispositivos. (Goud & Vaish, 2023) (Azevedo y otros, 2019)

No se reportaron complicaciones mecánicas, estéticas ni biológicas durante el seguimiento clínico, lo que sugiere que la inclusión de grafeno en la fabricación de prótesis bucales no solo mejora sus propiedades mecánicas, sino que también garantiza su seguridad y efectividad. Adicionalmente, el grafeno exhibe propiedades antimicrobianas que contribuyen a la reducción de la carga bacteriana en la superficie de las prótesis, lo que puede ser crucial para prevenir infecciones y mejorar la salud bucal de los pacientes. El desempeño

clínico de una prótesis está directamente vinculado a las propiedades mecánicas del material y a su proceso de fabricación. (K. y otros, 2023) (Cecilia y otros, 2019)

Estos hallazgos subrayan la eficacia del grafeno como aditivo en el diseño de prótesis, abriendo la puerta a futuras investigaciones y aplicaciones en odontología. La combinación de resistencia, estética, biocompatibilidad y actividad antimicrobiana resalta el potencial del grafeno para mejorar la calidad de vida de los pacientes que requieren prótesis dentales.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- El grafeno es un material que destaca por su elevada resistencia mecánica, así como por su biocompatibilidad y características antibacterianas. Su resistencia permite soportar fuerzas masticatorias sin comprometer las restauraciones, mientras que su biocompatibilidad minimiza el riesgo de reacciones adversas en los tejidos, asegurando su seguridad en odontología. Además, sus propiedades antibacterianas inhiben el crecimiento de bacterias, mejorando la salud bucal y reduciendo el riesgo de infecciones. Estas características hacen del grafeno una opción innovadora y de gran potencial en el ámbito prostodóntico.
- Los estudios indican que el PMMA dopado con grafeno mejora la durabilidad de las restauraciones, mostrando buena biocompatibilidad y actividad antimicrobiana en comparación con materiales convencionales. Sin embargo, las limitaciones en su uso se derivan de la variabilidad de propiedades según la concentración de grafeno y la escasez de investigación disponible.
- Los hallazgos de esta investigación sugieren que el grafeno tiene un gran potencial en prótesis dentales fijas, mejorando las propiedades mecánicas, estéticas y biológicas de los materiales. Estudios y casos clínicos muestran que el PMMA reforzado con grafeno aumenta la resistencia a la fractura, durabilidad y biocompatibilidad, además de ofrecer beneficios antimicrobianos. Aunque se necesita más validación clínica, los resultados actuales indican que el grafeno puede transformar la prostodoncia, proporcionando soluciones más efectivas y satisfactorias para los pacientes

5.2. Recomendaciones

- Investigar la eficacia del G-CAM, dada la escasez de estudios específicos en este ámbito.
- Continuar con la investigación sobre las propiedades y aplicaciones del grafeno, prestando especial atención a su biocompatibilidad, lo que facilitará la optimización de los métodos de uso de este material y permitirá evaluar sus efectos a largo plazo.
- Realizar estudios clínicos a gran escala para evaluar el rendimiento del grafeno en prótesis dentales en situaciones reales, comparando los resultados de prótesis tradicionales con las fabricadas con grafeno, con el fin de validar los beneficios teóricos observados en estudios preclínicos.

6. BIBLIOGRAFÍA

- A., A.-N., y SCF., R. (2023). A novel bioactive glass/graphene oxide composite coating for a polyether ether ketone-based dental implant. *Eur J Oral Sci*, 131(2).
- Abad-Coronel, C., Calle, C., Abril, G., Paltán, C., y Fajardo, J. (2023). Fracture Resistance Analysis of CAD/CAM Interim Fixed Prosthodontic Materials: PMMA, Graphene, Acetal Resin and Polysulfone. *Polymers*, 15(1761).
- Abdo, M. S., Shar, M. A., Fouly, A., Dar, M. A., y Abdo, H. S. (2024). Experimental investigation on the tribo-mechanical behavior of PMMA reinforced by solid lubricant filler for dental implant applications. *AIP Advances*, 095210.
- Aleman, J. (2019). *Grafeno un material de futuro en protesis dentales*. Madrid: Consejo General de Protésicos Dentales de España. Consejo General de Protésicos Dentales de España.
- Amal, S. (2024). Applications of graphene oxide and reduced graphene oxide in advanced dental materials and therapies. *Journal of Taibah University Medical Sciences*, 19(2).
- Apostu, A., Sufaru, I., Tanculescu, O., Stoleriu, S., Doloca, A., y Ciocan Pendefunda, A. (2023). Can Graphene Pave the Way to Successful Periodontal and Dental Prosthetic Treatments? A Narrative Review. *Biomedicines*, 11(9), 1-35.
- Apostu, A., Sufaru, I.-G., Tanculescu, O., Stoleriu, S., Doloca, A., y Ciocan Pendefunda, A. (2023). ¿Puede el grafeno allanar el camino hacia tratamientos periodontales y protésicos dentales exitosos? Una revisión narrativa. *Biomedicinas*, 11.
- Asanah, R., Dasmawati, M., Fatimah, S. A., Rahman, A., Manaf, A., y Habsah, H. (2022). Mechanism and factors influence of graphenebased nanomaterials antimicrobial activities and application in dentistry. *Journal of Materials Research and Technology*, 11(1290).
- Azevedo, L., Antonaya-Martin, J. L., Molinero-Mourelle, P., y Río-Highsmith, J. (2019). Improving PMMA resin using graphene oxide for a definitive prosthodontic rehabilitation - A clinical report. *J Clin Exp Dent*, 11(7).
- Bacali, C., Carpa, R., Buduru, S., Moldovan, M., Baldea, I., Constantin, A., . . . Lucaciu, O. (2019). The Influence of Graphene in Improvement of Physico-Mechanical Properties in PMMA Denture Base Resins. *Materials*, 12.
- Bacali, C., Carpa, R., Buduru, S., Moldovan, M., Baldea, I., Constantin, A., . . . Lucaciu, O. (2021). Association of Graphene Silver Polymethyl Methacrylate (PMMA) with

- Photodynamic Therapy for Inactivation of Halitosis Responsible Bacteria in Denture Wearers. *Nanomaterials*, 11(1643).
- Beatriz, D. S., Ana Beatriz, V. T., y Andréa, C. R. (2023). Graphene loaded into dental polymers as reinforcement of mechanical properties: A systematic review. *Journal of Materials Research and Technology*, 59.
- Bettencourt, A., Jorge, C., Anes, V., y Bettencourt, C. (2024). Systematic Review Effect of the Incorporation of Compounds into Digitally Manufactured Dental Materials—A Systematic Review. *Applied Sciences*, 14.
- Bozhana, C., Mariya, D., Angelina, V., Ilian, H., Zlatina, T., y Rada, K. (2024). Comparative Analysis of the Mechanical Properties and Biocompatibility between CAD/CAM and Conventional Polymers Applied in Prosthetic Dentistry. *Polymers*, 16.
- Campos, M. (2017). Evaluation of contact angle and mechanical properties of resin monomers filled with grafene oxide nanofibers. *J Sains dan Seni ITS*. 6(1), 51-66.
- Cecilia, B., Mindra, B., Marioara, M., Codruta, S., Vivi, N., Ioana, B., . . . Constantiniuc, M. (2019). The Influence of Graphene in Improvement of Physico-Mechanical Properties in PMMA Denture Base Resins. *Materials*, 12(23335).
- Chávez, R. (2022). Retrieved 06 de septiembre de 2024, from Adición de óxido grafeno a resina autopolimerizable, termopolimerizable y PMMA prepolimerizado: evaluación de propiedades físicas, antimicrobianas y biocompatibilidad.
- De Angelis, F., Vadini, M., Buonvivere, M., Valerio, A., Di Cosola, M., Piattelli, A., . . . D'Arcangelo, C. (2023). In Vitro Mechanical Properties of a Novel Graphene-Reinforced. *Polymers*, 15(622).
- De Angelis, F., Vadini, M., Buonvivere, M., Valerio, A., Di Cosola, M., Piattelli, A., . . . D'Arcangelo, C. (2024). Flexural Properties of Three Novel 3D-Printed Dental Resins. *Prosthesis*, 6.
- DI CARLO, S., ANGELIS, F. D., BRAUNER, E., PRANNO, N., TASSI, G., SENATORE, M., y BOSSÙ, M. (2020). Flexural strength and elastic modulusevaluation of structures made by conventional. *European Review for Medical and Pharmacological Sciences*, 24.
- Dinesh, R., Viritpon, S., Janak, S., Jiaqian, Q., Krisana, S., y Vilailuck, S. (2018). Polymeric materials and films in dentistry: An overview. *Journal of Advanced Research*, 14.
- Duraisamy, R., Ganapathy, D. M., y Shanmugam, R. k. (2021). Nanocomposites Used In Prosthodontics And Implantology - A Review. *International Journal of Dentistry and Oral Science*, 8(9).

- E, A., R, F., C, G., C, H., H, K., y P, T. (2015). Aromataris E, Fernandez R, Godfrey C, Holly C, Kahlil H, Tungpunkom P. *Int J Evid Based Healthc*, 13(3), 132-40. Aromataris E, Fernandez R, Godfrey C, Holly C, Kahlil H, Tungpunkom P.: https://jbi.global/sites/default/files/2021-10/Checklist_for_Systematic_Reviews_and_Research_Syntheses.docx
- Gao, Y., kang, K., Luo, B., Sun, X., Lan, F., y He, J. (septiembre de 2022). Graphene oxide and mineralized collagen-functionalized dental implant abutment with effective soft tissue seal and remotely repeatable photodisinfection. *Regen Biomater*, 1(9).
- García-Contreras, R., Guzmán-Juárez, H., López-Ramos, D., y Alvarez-Gayosso, C. (2021). Biological and physico-mechanical properties of poly(methyl methacrylate) enriched with graphene oxide as a potential biomaterial. *J Oral Res*, 10(2).
- Ghodrati, P., y Sharafeddin, F. (AGOSTO de 2023). Evaluation of the effect of nano-graphene oxide on shear bond strength of conventional and resin-modified glass ionomer cement. *Clin Exp Dent Res.*, 9(5).
- Goud, A., y Vaish, S. (2023). All-on-Four Case Rehabilitated with Fully Digitally Fabricated Prosthesis Milled from Graphene-Reinforced Poly Methyl Methacrylate Puck Using Indigenously Developed Intraoral and Extraoral Scanning Methods. *Contemporary Clinical Dentistry*, 15(3).
- Guazzo, R., Gardin, C., Bellin, G., Sbricoli, L., Ferroni, L., Ludovicheti, F. S., y Piattelli, A. (2018). Graphene-Based Nanomaterials for Tissue Engineering in the Dental Field. *Nanomaterials*, 8(349).
- Gülce, Ç., Mustafa, B. D., Canan, A., Samir, A., Martin, S., y Burak, Y. (2022). Effect of thermocycling on the flexural strength and hardness of new-generation denture base materials. *Journal of prosthodontics*, 7.
- Hajishengallis, E., Parsaei, Y., Klein, M., y Koo, H. (mayo de 2017). Advances in the microbial etiology and. *Mol Oral Microbiol.*, 32(1).
- Hrishikesh, M., Sumit, B., Aishwarya, R., Mridula, J., Mahesh, G., y Aarti, B. (2023). Upgrading Restorative Dentistry with Graphene Nanoparticles:. *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, 20(3).
- Hussein, M. (2022). Biomechanical Performance of PEEK and Graphene-Modified PMMA as Telescopic Removable Partial Denture Materials: A Nonlinear 3D Finite Element Analysis. *The International Journal of Prosthodontics*, 35(6).

- Hussein, M. (2023). Dimensional Optimization of Graphene-Modified Polymethyl Methacrylate Material Used as an Aesthetic Removable Partial Denture Clasp Material. *European Journal of General Dentistry*, 12(26).
- Inchingolo, F., Inchingolo, A., Latini, G., Palmieri, G., Di Pede, C., Trilli, I., . . . jal., e. (2023). Application of Graphene Oxide in Oral Surgery: A Systematic Review. *Materials*, 16.
- J., M., PS., M., y S., K. K. (2022). Application of Graphene: A Nanostar in the World of Dentistry. *RGUHS J Dent Sci*, 14(4), 8-18.
- JBI. (s.f.). Retrieved 01 de septiembre de 2024, from Case Reports: https://jbi.global/sites/default/files/2021-10/Checklist_for_Case_Reports.docx
- JBI. (2024). Retrieved 2024, from The revised JBI critical appraisal tool for the assessment of risk of bias quasi-experimental studies.: https://jbi.global/sites/default/files/2024-04/2_JBI%20checklist%20for%20quasi-experimental%20studies.docx
- José Antonio, H., Karla Daniela, M., Ana, B.-C., y Sidney, K. (2020). The effect of thermocycling on surface microhardness of PMMA doped with graphene: an experimental in vitro study. *J Clin Dent Res*.
- K., Y., Kasim, M., y Preetha, K. (2023). Effect of Graphene Oxide Nanoparticles on the Flexural Strength of all Ceramics- An In-vitro Study. *Journal of Clinical and Diagnostic Research*, 17(2).
- Kanemoto, Y., Miyaji, H., Nishida, E., Hamamoto, A., Sugaya, T., Gohda, S., y Ono. (2023). Water-resistant antibacterial properties of a graphene oxide/cetylpyridinium chloride complex formed on medical gauze fibers. *Journal of oral biosciences*, 65(2), 202-205.
- Khan, A., Al-Khureif , A., Saadaldin, S., Mohamed, B., Musaibah, A., y Divakar, D. (julio de 2019). Graphene oxide-based experimental silane primers enhance shear bond strength between resin composite and zirconia. *Eur J Oral Sci*, 127(6).
- Kumari, S. P., Prasanna, B., Sinha, N., y Singh, S. (2023). Graphene: A Boon In Dentistr. *Journal of Dental Sciences*, 15(2).
- Li, X., Liang, X., Wang, Y., Wang, D., Teng, M., Xu, H., . . . Han, L. (2022). Graphene-Based Nanomaterials for Dental Applications: Principles, Current Advances, and Future Outlook. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 10.
- Liu, C., Tan, D., Chen, X., Liao, J., y Wu, L. (2022). Research on Graphene and Its Derivatives in Oral. *Int. J. Mol. Sci*, 23(4737).

- Madaan, J., Manoharan, P., y Kiran, S. (enero de 2022). Application of Graphene: A Nanostar in the World of Dentistry. *RGUHS J Dent Sci.*, 14(4).
- Malik, S., Ruddock, F., Dowling, A., Byrne, K., Schmitt, W., Khanlakhani, I., y Nemoto, Y. (2018). Graphene composites with dental and biomedical applicability. *Beilstein J. Nanotechnol.*, 9.
- Malta, A., Cortez, D., Romao, D., Pereira, J., Velo, M., y Nascimento, T. (marzo de 2019). Graphene Oxide Applications in Dentistry: Integrative Literature Review. *Heal Sci.*, 21(4).
- Mansouri, N., Al-Sarawi, S., Losic, D., Mazumdar, J., Clark, J., y Gronthos, S. (2021). Biodegradable and biocompatible graphene-based scaffolds for functional neural tissue engineering: A strategy approach using dental pulp stem cells and biomaterials. *Biotechnol Bioeng.*, 118(11), 4217-30.
- Mishyn, V., Rodrigues, T., Leroux, Y., Aspermaier, P., Happy, H., y Bintingier, J. (2021). Controlled covalent functionalization of a graphene-channel of a field effect transistor as an ideal platform for (bio)sensing applications. *Nanoscale Horizons*, 6(10), 819-29.
- Mobarak, M. H., Hossain, N., Hossain, A., Mim, J. J., Khan, F., Rayhan, M. T., . . . Chowdhury, M. A. (2023). Advances of graphene nanoparticles in dental implant applications – A review. *Applied Surface Science Advances* , 18.
- Mocanu, A., Miculescu, F., Stan, G., Ciocoiu, R., Corobea, M., y Miculescu, M. (julio de 2021). Preliminary studies on graphene-reinforced 3d products obtained by the one-stage sacrificial template method for bone reconstruction applications. *J Funct Biomater.*, 12(1).
- Moldovan, M., Ducea, D., Cuc, S., Sarosi, C., Prodan, D., y Petean, I. (2023). Chemical and Structural Assessment of New Dental Composites with Graphene Exposed to Staining Agents. *J Funct Biomater.*, 14(3), 1-16.
- Muhammad, A.-W., Iman Q., A. S., Suhair G., H., y Mohsin Abdullah, A.-S. (2020). Life Enhancement of Partial Removable Denture made by Biomaterials Reinforced by Graphene Nanoplates and Hydroxyapatite with the Aid of Artificial Neural Network. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 43(6).
- Mutluay, S. (2022). A comparison of the effect of different forms of Graphene and Polyvinylpyrrolidone on physically strengthening PMMA. *Dental Research Journal*, 2(2).
- Nagesh, K. (3 de 2011). RGUHS Dent Sci. *Journal of Dental Sciences*, 1(2).

- Novalbos, E. (s.f.). Retrieved 02 de septiembre de 2024, from Influencia de los Parámetros del diseño de prótesis (GCAM) sobre implantes fabricadas mediante sistemas CAD/CAM:
https://issuu.com/fnovalbos/docs/dentalprotesis_n208_compressed/s/11655821
- Ortensi, L., Grande, F., Testa, C., Balma, A. M., Pedraza, R., Mussano, F., . . . Pedulla, E. (2024). Fracture strength of 3-units fixed partial dentures fabricated with metal-ceramic, graphene doped PMMA and PMMA before and after ageing: An in-vitro study. *Journal of Dentistry*, 142.
- P., G., y F., S. (2023). Evaluation of the effect of nano-graphene oxide on shear bond strength of conventional and resin-modified glass ionomer cement. *Clin Exp Dent Res*, 9(5), 851-8.
- Pandit, S., Gaska, K., Kádár, R., y Mijakovic, I. (2021). Graphene-Based Antimicrobial Biomedical Surfaces. *ChemPhysChem*, 22(1).
- Passaretti, P. (marzo de 2022). Graphene Oxide and Biomolecules for the Production of Functional 3D Graphene-Based Materials. *Front Mol Biosci*, 1(9).
- Poojar, B., Ommurugan, B., Adiga, S., Thomas, H., Sori, R., y Poojar, B. (1 de 2017). Methodology Used in the Study. *Asian J Pharm Clin Res*, 7(10).
- Prathap, D. (enero de 2017). Age Determination in Forensic Odontology. *Prosthodont Restor Dent*, 7(1). Age Determination in Forensic Odontology.
- Punset, M., Brizuela, A., Pérez, E., Herrero, M., Manero, J., y Gil, J. (julio de 2022). Mechanical Characterization of Dental Prostheses Manufactured with PMMA–Graphene Composites. *Materials (Basel)*, 15(15).
- Qi, X., Jiang, F., Zhou, M., Zhang, W., y Jiang, X. (2021). Graphene oxide as a promising material in dentistry and tissue regeneration: A review. *Smart Materials in Medicine*, 2.
- Ramalho, D., y Silva, D. (enero de 2023). Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro. *Rev Multidiscip do noreste Min*, 12(2).
- Rokaya, D., Srimaneepong, V., Qin, J., Siraleartmukul, K., y Siriwongrungson, V. (Febrero de 2019). GrapheneGraphene Oxide/Silver Nanoparticle Coating Produced by Electrophoretic Deposition Improved the Mechanical and Tribological Properties of NiTi Alloy for Biomedical Applications. *Nanosci NanotechnoL*, 19(7).
- Ruan, S., Zhao, Y., Chen, R., Ma, J., Guan, Y., Ma, J., y Ren, L. (2024). Effect of zinc oxide/graphene oxide nanocomposites on the cytotoxicity, antibacterial and mechanical properties of polymethyl methacrylate. *BMC Oral Health*, 24(1013).

- Rygas, J., Matys, J., Wawrzyńska, M., Szymonowicz, M., y Dobrzyński, M. (2023). The Use of Graphene Oxide in Orthodontics—A Systematic. *J. Funct. Biomater.*, 14.
- Sahm, B., Teixeira, A., y Reis, A. (julio de 2023). Graphene loaded into dental polymers as. *Jpn Dent Sci Rev*, 59(4).
- Salgado, H., Fonseca, P., Vaz, M., y Maria Helena Figueira, P. M. (2022). The use of graphene for dental polymethylmethacrylate. *Rev port estomatol med dent cir maxilofac*, 63(4).
- Salgado, H., Gomes, A., Duarte, A., Ferreira, J., Fernandes, C., Figueiral, M., y Mesquita, P. (2022). Antimicrobial Activity of a 3D-Printed Polymethylmethacrylate Dental Resin Enhanced with Graphene. *Biomedicines*, 10.
- Salgado, H., Gomes, A., Duarte, A., Ferreira, J., Fernandes, C., Figueiral, M., y Mesquita, P. (2023). Mechanical and surface properties of a 3D-printed. *Rev port estomatol med dent cir maxilofac*, 64(1).
- SAVA, S., MOLDOVAN, M., SAROSI, C., MESAROS, A., DUDEA, D., y ALB, C. (2015). Effects of Graphene Addition on the Mechanical Properties of Composites for Dental Restoration. *MATERIALE PLASTICE*, 52(1).
- Sava, S., Moldovan, M., y Sarosi, C. (2015). Effects of Graphene Addition on the Mechanical Properties of Composites for Dental Restoration. *MATERIALE PLASTICE*, 52(1).
- Selva-Otaolaurruchi, E., Fernández-Estevan, L., Solá-Ruiz, M., García-Sala-Bonmati, F., Selva-Ribera, I., y Agustín-Panadero, R. (2023). Graphene-Doped Polymethyl Methacrylate (PMMA) as a New Restorative Material in Implant-Prosthetics: In Vitro Analysis of Resistance to Mechanical Fatigue. *J. Clin. Med*, 12(1269).
- Serrano-Belmonte, I., Cascales-Pérez, F. J., Pérez-Fernández, V., Martínez-Cánovas, A., y Tudela-Mulero, M. R. (2024). Effects of adding graphene fibers to polymethyl methacrylate on biocompatibility and surface characterization. *THE JOURNAL OF PROSTHETIC DENTISTRY*, 30(20).
- Shanmugam, D., Y., M., Manimaran, A., Kaliaraj, G., KG., M., y Kandhasamy, N. (2023). Efficacy of Graphene-Based Nanocomposite Gels as a Promising Wound Healing Biomaterial. *Gels*, 9(1).
- Sharafeddin, F., y Farhadpour, H. H. (2023). Evaluation of the Effect of Nanoparticle Graphene Oxide on Flexural Strength of Glass Ionomer Cements. *Int J Dent*.

- Shin, Y. C., Bae, J.-H., Lee, J. H., Raja, I. S., Kang, M. S., Kim, B., . . . Han, D.-W. (2022 de Biomaterials Research). Enhanced osseointegration of dental. *Biomaterials Research*, 26.
- Sindi, A. (2024). Applications of graphene oxide and reduced graphene oxide in advanced dental materials and therapies. *J Taibah Univ Med Sci*, 10(2), 403-421.
- Son, S., Kim, D., Yoo, K., Yoon, S., y Kim, Y. (febrero de 2020). Mesoporous bioactive glass combined with graphene oxide quantum dot as a new material for a new treatment option for dentin hypersensitivity. *Nanomaterials*, 1(5).
- Srimaneepong, V., Skallevoid, H., Khurshid, Z., Rokaya, D., y Sapkota, J. (julio de 2022). Graphene for antimicrobial and coating application. *Int J Mol Sci*, 23(1).
- Srivastava, A., Hazra, R., Kumar, D., Khattak, A., y Legha, V. (junio de 2022). Annals of Prosthodontics and Restorative Dentistry Graphene. *The game changer in dentistry*, 8(1).
- Tahriria, M., Monicoa, M. D., Moghanianb, A., Yarakic, M. T., Torresa, R., Yadegaria, A., y Tayeb, L. (2019). Graphene and its derivatives: Opportunities and challenges in dentistry. *Materials Science and Engineering: C*, 102.
- Tang, S., Gao, X., Guo, H., Guan, Y., Lin, M., y Zheng, Z. (2023). Effects of silver nanoparticle/graphene oxide composite on the properties of polymethyl methacrylate base material in vitro. *Materials Technology*, 38(1).
- Tejas, B., Deepak, R., y Pratik, K. (2021). Nanotechnology-based materials as emerging trends for dental applications. *Rev. Adv. Mater. Sci.*(60).
- Vaidya, R. Y., I.N, A., Balakrishnan, D., Nakata, H., S, K., y Krishnamoorthy, G. (2024). Impact of graphene incorporation in dental implants–A. *Heliyon*, 10(18).
- Wei, J., Qiao, S., Zhang, X., Li, Y., Zhang, Y., y Wei, S. (abril de 2021). Graphene-Reinforced Titanium Enhances Soft Tissue Seal. *Front Bioeng Biotechnol*, 4(9).
- Williams, A. G., Moore, E., Thomas, A., y Johnson, A. (2023). Graphene-Based Materials in Dental Applications: Antibacterial, Biocompatible, and Bone Regenerative Properties. *International Journal of Biomaterials*, 18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2023/8803283>
- Woźniak-Budyń, M., Staszak, M., y Stasza, K. (2023). A critical review of dental biomaterials with an emphasis on biocompatibility. *Dent Med Probl*, 60(4).
- Yilmaz, S. C. (2019). for an Uncommon Neurosurgical Emergency in a Developing Country. *Niger J Clin Pract*, 22, 1070-77.

- Zapico, S., y Adserias, J. (mathewsopenaccess). Retrieved 15 de enero de 2024, from Age Assessment in Forensic Cases: Anthropological, Odontological and Biochemical Methods for Age Estimation in the Dead: <http://www.mathewsopenaccess.com/>
- Zhang, Y., Gulati, K., Li, Z., Di, P., y Liu, Y. (2021). Dental Implant Nano-Engineering: Advances, Limitations and Future Directions. *Nanomaterials*, 11.
- Ziyu, G., Luming, Y., Fang, X., Yani, W., Tingting, Y., y Jing, C. (2018). Graphene Family Nanomaterials: Properties and Potential Applications in Dentistry. *International Journal of Biomaterials*, 2018(1).