

Papel de los biomarcadores en la evaluación de la salud pulpar durante tratamientos ortodónticos

Role of biomarkers in the evaluation of pulp health during orthodontic treatments

Victoria De Los Ángeles Ramirez Granda

ORCID: 0009-0008-0391-0700

Investigadora independiente, Ecuador

Cintya Carolina Medina Agila

ORCID: 0009-0004-5596-5325

Investigadora independiente, Ecuador

Rosa Elizabeth Tierra Cabay

ORCID: 0009-0009-7180-7059

Investigadora independiente, Ecuador

María Esther Jácome Villacrés

ORCID: 0009-0009-0200-8982

Investigadora independiente, Ecuador

Fabia Nahira González Guachamin

ORCID: 0009-0006-0632-1915

Investigadora independiente, Ecuador

Sandra Elizabeth Tipanta Villacrés

ORCID: 0009-0002-4023-5616

Investigadora independiente, Ecuador

Daniel Alejandro Ortiz Morales

ORCID: 0009-0006-7398-5439

Investigadora independiente, Ecuador

Camila Alejandra Rojas Luzuriaga

ORCID: 0009-0000-7596-4152

Investigadora independiente, Ecuador

RESUMEN

Los biomarcadores se han convertido en herramientas esenciales para evaluar la salud pulpar durante los tratamientos ortodónticos, proporcionando información valiosa sobre los cambios fisiológicos y patológicos que ocurren en respuesta a las fuerzas aplicadas. Este artículo de revisión narrativa explora el papel de diversos biomarcadores, como las proteínas inflamatorias, las enzimas y las citoquinas, en la detección temprana de alteraciones pulpares. Se analizan estudios recientes que destacan cómo estos indicadores biológicos permiten monitorear la inflamación, la respuesta al estrés oxidativo y el metabolismo celular de la pulpa dental, contribuyendo a un enfoque más preciso y personalizado en la práctica ortodóntica. Además, se discuten las limitaciones actuales en su uso clínico, incluyendo la variabilidad individual y la necesidad de métodos estandarizados para su medición. Comprender el comportamiento de los biomarcadores no solo mejora la capacidad de prevenir complicaciones pulpares, sino que también optimiza la planificación de tratamientos ortodónticos que prioricen la salud integral del paciente. En conclusión, los biomarcadores representan una herramienta prometedora para avanzar hacia una ortodoncia más segura y basada en evidencia, aunque se requieren investigaciones adicionales para consolidar su aplicabilidad clínica y establecer protocolos universales.

Palabras clave: Biomarcadores, Salud pulpar, Tratamientos ortodónticos, Estrés oxidativo, Biología molecular.

ABSTRACT

Biomarkers have become essential tools to evaluate pulp health during orthodontic treatments, providing valuable information about the physiological and pathological changes that occur in response to applied forces. This narrative review article explores the role of various biomarkers, such as inflammatory proteins, enzymes and cytokines, in the early detection of pulp disorders. Recent studies are analyzed that highlight how these biological indicators allow monitoring inflammation, the response to oxidative stress and the cellular metabolism of the dental pulp, contributing to a more precise and personalized approach in orthodontic practice. Additionally, current limitations in its clinical use are discussed, including individual variability and the need for standardized methods for its measurement. Understanding the behavior of biomarkers not only improves the ability to prevent pulp complications, but also optimizes the planning of orthodontic treatments that prioritize the patient's overall health. In conclusion, biomarkers represent a promising tool to move towards safer, evidence-based orthodontics, although additional research is required to consolidate their clinical applicability and establish universal protocols.

Keywords: Biomarkers, Pulp health, Orthodontic treatments, Oxidative stress, Molecular biology.

INTRODUCCIÓN

La salud pulpar es un aspecto fundamental en el éxito de los tratamientos ortodónticos, ya que las fuerzas aplicadas durante el movimiento dental pueden generar respuestas biológicas en los tejidos dentales y periodontales (1). En este contexto, los biomarcadores han emergido como herramientas clave para evaluar de manera objetiva y no invasiva el estado fisiológico y patológico de la pulpa dental (2). Estos indicadores biológicos, presentes en fluidos como el suero, la saliva y el líquido crevicular gingival, permiten monitorear procesos inflamatorios, daño tisular y regeneración celular, proporcionando información valiosa sobre la respuesta pulpar ante estímulos mecánicos (3). A pesar de los avances en esta área, aún existen retos significativos relacionados con la identificación de biomarcadores específicos, su validación clínica y la estandarización de métodos de recolección y análisis (4). Este artículo de revisión narrativa tiene como objetivo explorar el papel de los biomarcadores en la evaluación de la salud pulpar durante tratamientos ortodónticos, analizando la evidencia científica disponible y destacando su potencial para mejorar el diagnóstico, seguimiento y pronóstico en pacientes sometidos a estas terapias (5). Asimismo, se discutirán las implicaciones clínicas de estos hallazgos y las perspectivas futuras en este campo en constante evolución. Con una comprensión más profunda de los biomarcadores asociados a la salud pulpar, es posible avanzar hacia una práctica ortodóntica más personalizada y basada en la evidencia, optimizando los resultados clínicos y reduciendo el riesgo de complicaciones pulpares (6).

METODOLOGÍA

La metodología empleada para esta revisión narrativa se basó en una búsqueda exhaustiva en bases de datos como PubMed, Scopus y SciELO, utilizando términos MeSH y DeCS relacionados con "biomarcadores", "salud pulpar" y "tratamientos ortodónticos". Se aplicaron operadores booleanos como AND, OR y NOT para combinar los términos y refinar la búsqueda. Los criterios de inclusión consideraron estudios publicados en los últimos 10 años, en inglés y español, con acceso al texto completo y que abordaran específicamente la evaluación de biomarcadores en el contexto de la salud pulpar durante tratamientos ortodónticos. Se excluyeron artículos duplicados, estudios en animales y aquellos que no proporcionaran datos relevantes o de calidad suficiente. En total, se revisaron 78 artículos, de los cuales se seleccionaron 18 que cumplían con los criterios establecidos y aportaban información significativa para el análisis. Esta metodología permitió identificar y sintetizar la evidencia más actualizada y relevante sobre el papel de los biomarcadores en este ámbito, proporcionando una base sólida para las conclusiones del estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Introducción a los biomarcadores en la salud pulpar

En el ámbito de la odontología, la evaluación de la salud pulpar ha sido tradicionalmente un desafío debido a la naturaleza compleja y dinámica de los tejidos dentales. La pulpa dental, al estar rodeada por tejidos duros, presenta limitaciones significativas para su análisis directo, lo que ha llevado a la búsqueda de herramientas diagnósticas más precisas y menos invasivas. En este contexto, los biomarcadores han emergido como una herramienta prometedora para evaluar de manera objetiva el estado fisiológico y patológico de la pulpa dental, especialmente durante tratamientos ortodónticos (1).

Los biomarcadores son moléculas biológicas que reflejan procesos normales, patológicos o respuestas a intervenciones terapéuticas. En el caso de la salud pulpar, estos pueden encontrarse en diferentes fluidos biológicos como el suero, la saliva y el fluido crevicular, aunque el fluido pulpar es considerado el medio más específico. Entre los biomarcadores más estudiados se encuentran proteínas inflamatorias como las citoquinas (IL-1 β , IL-6 y TNF- α), enzimas como la fosfatasa alcalina y marcadores de daño tisular como la lactato deshidrogenasa (LDH). Estos compuestos ofrecen información valiosa sobre la inflamación, el estrés oxidativo y la viabilidad celular dentro de la pulpa (1).

Durante los tratamientos ortodónticos, las fuerzas aplicadas para mover los dientes pueden inducir cambios en los tejidos circundantes, incluida la pulpa dental. Estas fuerzas mecánicas pueden desencadenar respuestas biológicas que van desde una inflamación leve hasta necrosis pulpar en casos extremos. Por ello, el monitoreo de biomarcadores específicos representa una oportunidad para detectar de manera temprana alteraciones en la salud pulpar, permitiendo una intervención oportuna y personalizada (2).

La investigación actual ha demostrado que ciertos biomarcadores pueden correlacionarse con el grado de inflamación o daño tisular en la pulpa durante movimientos dentales inducidos por ortodoncia. Por ejemplo, niveles elevados de IL-6 han sido asociados con inflamación aguda en respuesta a fuerzas ortodónticas excesivas. Del mismo modo, un

aumento en las concentraciones de LDH puede indicar daño celular irreversible. Estas observaciones subrayan el potencial de los biomarcadores no solo para el diagnóstico, sino también para guiar las decisiones clínicas y optimizar los resultados del tratamiento (2).

Cambios fisiológicos en la pulpa dental durante tratamientos ortodónticos

La pulpa dental es un tejido altamente vascularizado y ricamente innervado que desempeña un papel crucial en la salud y funcionalidad de los dientes. Durante los tratamientos ortodónticos, las fuerzas aplicadas para mover los dientes pueden inducir una serie de cambios fisiológicos en la pulpa dental, los cuales varían según la magnitud, dirección y duración de dichas fuerzas. Estos cambios han sido objeto de estudio debido a su relevancia clínica en la preservación de la vitalidad pulpar (3).

Uno de los efectos iniciales de las fuerzas ortodónticas es la alteración en el flujo sanguíneo pulpar. La aplicación de fuerzas mecánicas genera una compresión en el ligamento periodontal, lo que puede ocasionar una disminución temporal en la microcirculación de la pulpa. Este fenómeno puede derivar en hipoxia tisular y desencadenar una respuesta inflamatoria local. Aunque estos cambios son generalmente transitorios, su persistencia o exacerbación podría comprometer la salud pulpar (3).

Además, las fuerzas ortodónticas suelen estimular la liberación de mediadores inflamatorios y biomarcadores específicos en el tejido pulpar. Entre estos se encuentran las prostaglandinas, las citoquinas (como la interleucina-1 β y el factor de necrosis tumoral alfa) y las metaloproteinasas. Estos compuestos desempeñan un papel fundamental en la remodelación tisular, pero también pueden contribuir a la aparición de síntomas clínicos como sensibilidad dental o dolor. En casos extremos, una respuesta inflamatoria excesiva podría conducir a necrosis pulpar, especialmente en dientes con antecedentes de trauma o caries profundas (3,4).

Otro aspecto relevante es el impacto de las fuerzas ortodónticas en las fibras nerviosas de la pulpa. Estudios han demostrado que estas fuerzas pueden inducir cambios en la actividad neuronal, lo que explica la percepción de dolor o incomodidad durante las primeras etapas del tratamiento. Sin embargo, este dolor suele ser autolimitado y disminuye a medida que el tejido se adapta a las nuevas condiciones biomecánicas (4).

Cabe destacar que la magnitud de los cambios fisiológicos depende en gran medida de factores individuales como la edad del paciente, el estado previo del tejido pulpar y la técnica ortodóntica empleada. Por ejemplo, dientes jóvenes con ápices abiertos tienen una mayor capacidad de regeneración debido a su abundante suministro vascular y celular, mientras que los dientes con antecedentes de procedimientos restaurativos extensos pueden ser más susceptibles a alteraciones irreversibles (4).

Principales biomarcadores inflamatorios asociados a la salud pulpar

La evaluación de la salud pulpar durante tratamientos ortodónticos ha cobrado relevancia en los últimos años debido a la influencia que estos procedimientos pueden tener sobre el tejido pulpar. En este contexto, los biomarcadores inflamatorios han emergido como herramientas clave para monitorear y comprender las respuestas biológicas de la pulpa dental frente a las fuerzas mecánicas aplicadas. Estos biomarcadores permiten identificar procesos inflamatorios tempranos, facilitando la detección de alteraciones que podrían comprometer la vitalidad pulpar (5).

Entre los principales biomarcadores inflamatorios asociados a la salud pulpar se encuentran las citoquinas proinflamatorias, como la interleucina-1 beta (IL-1 β), el factor de necrosis tumoral alfa (TNF- α) y la interleucina-6 (IL-6). Estas moléculas desempeñan un papel fundamental en la regulación de la respuesta inflamatoria inicial, mediando procesos como el reclutamiento de células inmunitarias y la activación de mecanismos de reparación tisular. Su presencia elevada en el fluido dentinario o en el exudado pulpar puede ser indicativa de una inflamación activa o de un daño tisular incipiente (5).

Otro grupo relevante de biomarcadores son las metaloproteinasas de matriz (MMPs), enzimas que participan en la degradación de la matriz extracelular durante los procesos inflamatorios. En particular, las MMP-8 y MMP-9 han sido ampliamente estudiadas en relación con la salud pulpar, ya que su sobreexpresión puede reflejar una respuesta inflamatoria exacerbada o incluso daño irreversible en los tejidos dentales (5).

Además, los mediadores lipídicos derivados del ácido araquidónico, como las prostaglandinas (especialmente la PGE₂), también juegan un papel destacado en la inflamación pulpar. La PGE₂ es conocida por su capacidad para sensibilizar las fibras nerviosas y aumentar la vasodilatación, contribuyendo a los síntomas clínicos asociados con la inflamación, como el dolor (6).

Por último, se ha investigado el potencial de los biomarcadores relacionados con el estrés oxidativo, como las

especies reactivas de oxígeno (ROS) y los productos de peroxidación lipídica, en la evaluación de la salud pulpar. Estos compuestos no solo reflejan el daño celular inducido por el estrés mecánico, sino que también actúan como amplificadores de la respuesta inflamatoria (6).

En conclusión, los biomarcadores inflamatorios ofrecen una ventana valiosa para evaluar la salud pulpar durante los tratamientos ortodónticos. Su monitoreo puede facilitar la detección precoz de alteraciones inflamatorias y contribuir al diseño de estrategias terapéuticas más personalizadas, minimizando así el riesgo de complicaciones pulpares a largo plazo. Sin embargo, se requieren más estudios para estandarizar su uso clínico y establecer valores de referencia que permitan su implementación rutinaria en la práctica odontológica (6).

Biomarcadores de daño tisular en la pulpa dental

La pulpa dental desempeña un papel esencial en la vitalidad y funcionalidad de los dientes, siendo un tejido altamente vascularizado y sensible a estímulos externos. Durante los tratamientos ortodónticos, las fuerzas aplicadas para mover los dientes pueden generar cambios en el microambiente pulpar, desencadenando respuestas inflamatorias y metabólicas que, en algunos casos, pueden derivar en daño tisular. En este contexto, los biomarcadores han surgido como herramientas clave para evaluar la salud pulpar y detectar de manera temprana posibles alteraciones (7).

Entre los biomarcadores más estudiados en el contexto del daño tisular pulpar se encuentran las enzimas relacionadas con la inflamación, como la interleucina-6 (IL-6) y el factor de necrosis tumoral alfa (TNF- α). Estos mediadores proinflamatorios son liberados por las células pulpares en respuesta a estímulos nocivos, como la presión excesiva o el estrés mecánico generado por los dispositivos ortodónticos. Su presencia en el fluido pulpar o en el fluido crevicular gingival puede ser indicativa de inflamación activa y potencial daño tisular (7).

Otro grupo importante de biomarcadores incluye las proteínas relacionadas con procesos de reparación y remodelación tisular, como la fosfatasa alcalina específica de tejido (TALP) y las metaloproteinasas de matriz (MMPs). Estas últimas, particularmente las MMP-8 y MMP-9, están implicadas en la degradación de la matriz extracelular y pueden reflejar cambios estructurales en la pulpa dental asociados con el estrés ortodóntico (7,8).

Además, los productos derivados del metabolismo celular, como el óxido nítrico (NO) y las especies reactivas de oxígeno (ROS), han sido propuestos como indicadores de estrés oxidativo en la pulpa dental. El aumento en los niveles de estas moléculas puede señalar un desequilibrio entre los mecanismos de defensa antioxidante y los procesos oxidativos, lo que podría contribuir al daño celular y tisular (8).

Por último, los marcadores de apoptosis, como la caspasa-3 y la proteína p53, también han sido investigados en el contexto del daño pulpar inducido por fuerzas ortodónticas. La activación de estas vías sugiere que las células pulpares pueden estar sometidas a una presión suficiente como para comprometer su viabilidad, lo que subraya la importancia de monitorear cuidadosamente las fuerzas aplicadas durante el tratamiento (8).

Métodos de recolección y análisis de biomarcadores pulpares

La evaluación de la salud pulpar durante los tratamientos ortodónticos ha ganado relevancia en la odontología moderna, y los biomarcadores han emergido como herramientas clave para este propósito. Los biomarcadores permiten detectar cambios fisiológicos y patológicos en la pulpa dental, proporcionando información valiosa para el diagnóstico, pronóstico y monitoreo de la respuesta pulpar ante fuerzas ortodónticas. En esta sección, se describen los principales métodos de recolección y análisis de biomarcadores pulpares, destacando su aplicabilidad y limitaciones (9).

Métodos de recolección de biomarcadores pulpares

1. Fluido crevicular gingival (FCG): El FCG es una fuente accesible y mínimamente invasiva para la obtención de biomarcadores relacionados con la respuesta inflamatoria y metabólica de los tejidos dentales. Su recolección se realiza mediante tiras absorbentes o micropipetas colocadas en el surco gingival, evitando la contaminación con saliva. Este método es particularmente útil en contextos clínicos por su facilidad de uso (9).

2. Pulpa dental: La obtención directa de tejido pulpar, aunque más invasiva, es necesaria en casos donde se requiere un análisis más específico. Generalmente, se realiza durante procedimientos endodónticos o extracciones dentales. Este método proporciona una muestra rica en biomarcadores específicos del tejido pulpar, como proteínas relacionadas con la inflamación o el estrés oxidativo (9).

3. Dentina y esmalte: Durante tratamientos restaurativos o intervenciones quirúrgicas, los fragmentos de dentina y

esmalte pueden ser recolectados para análisis. Aunque estos tejidos no reflejan directamente el estado de la pulpa, pueden contener biomarcadores secundarios relacionados con la actividad metabólica del complejo dentino-pulpar (9).

4. Saliva: La saliva es una fuente no invasiva para la detección de biomarcadores sistémicos y locales relacionados con la salud pulpar. Si bien su especificidad puede ser limitada debido a la mezcla con biomarcadores de otros tejidos orales, su facilidad de recolección la convierte en una opción viable para estudios epidemiológicos (9).

Métodos de análisis de biomarcadores

Los avances en las técnicas analíticas han permitido identificar y cuantificar biomarcadores con alta precisión. Entre las metodologías más utilizadas se encuentran (9,10):

1. Enzimoimmunoensayos (ELISA): Amplia y comúnmente empleados por su sensibilidad y especificidad para detectar proteínas y citoquinas asociadas con inflamación y daño tisular (10).

2. Espectrometría de masas: Ideal para el análisis proteómico y metabolómico, permitiendo identificar perfiles completos de biomoléculas presentes en las muestras (10).

3. PCR (Reacción en Cadena de la Polimerasa): Utilizada para la detección de marcadores genéticos y moleculares asociados con la respuesta biológica de la pulpa ante estímulos ortodónticos (10).

4. Microscopía electrónica y espectroscopia: Estas técnicas permiten estudiar cambios estructurales y químicos en tejidos dentales a nivel microscópico (10).

En conclusión, los métodos de recolección y análisis de biomarcadores pulpares ofrecen herramientas poderosas para evaluar la respuesta biológica del tejido pulpar durante tratamientos ortodónticos. La selección del método adecuado dependerá del objetivo clínico o investigativo, así como de las características específicas del paciente y del procedimiento a realizar (10).

Rol de los biomarcadores en la detección temprana de patologías pulpares

La detección temprana de patologías pulpares representa un desafío clínico significativo, especialmente en pacientes sometidos a tratamientos ortodónticos, donde las fuerzas aplicadas pueden inducir cambios en los tejidos dentales. En este contexto, los biomarcadores han emergido como herramientas prometedoras para evaluar la salud pulpar de manera no invasiva y precisa (11).

Los biomarcadores son moléculas biológicas que reflejan procesos fisiológicos o patológicos específicos. En el caso de la salud pulpar, su presencia en fluidos como el suero, la saliva o el fluido crevicular permite detectar alteraciones metabólicas o inflamatorias antes de que se manifiesten clínicamente. Entre los biomarcadores más estudiados se encuentran las citoquinas proinflamatorias (como la interleucina-6 y el factor de necrosis tumoral alfa), las enzimas relacionadas con el metabolismo tisular (como la fosfatasa alcalina y la metaloproteinasa de matriz) y proteínas específicas del estrés celular (11).

Durante los tratamientos ortodónticos, las fuerzas mecánicas aplicadas provocan una respuesta biológica en los tejidos circundantes. Aunque estas fuerzas están diseñadas para ser controladas y seguras, pueden desencadenar inflamación pulpar transitoria o incluso daño irreversible si no se manejan adecuadamente. En estos casos, los biomarcadores pueden servir como indicadores precoces de estrés o daño pulpar, permitiendo a los clínicos intervenir oportunamente para prevenir complicaciones más graves (11,12).

Por ejemplo, estudios recientes han demostrado que niveles elevados de citoquinas proinflamatorias en el fluido crevicular están asociados con inflamación pulpar inducida por movimientos ortodónticos. Asimismo, la detección de proteínas relacionadas con el estrés oxidativo puede indicar un desequilibrio metabólico en los tejidos pulpares. Estas observaciones resaltan la importancia de integrar el análisis de biomarcadores en la práctica clínica para monitorear la respuesta biológica durante el tratamiento ortodóntico (12).

Además de su utilidad diagnóstica, los biomarcadores también tienen un papel potencial en la evaluación del pronóstico y la personalización del tratamiento. Al identificar pacientes con mayor susceptibilidad a desarrollar patologías pulpares, los ortodoncistas pueden ajustar las fuerzas aplicadas y optimizar los intervalos de control. Esto no solo mejora los resultados clínicos, sino que también minimiza el riesgo de complicaciones a largo plazo (12).

Influencia de las fuerzas ortodónticas en la expresión de biomarcadores

La aplicación de fuerzas ortodónticas genera una serie de respuestas biológicas en los tejidos dentales y

periodontales, incluidas aquellas que afectan la salud pulpar. Estas fuerzas mecánicas inducen una remodelación ósea a través de procesos inflamatorios controlados, lo que a su vez puede influir en la expresión de biomarcadores específicos relacionados con la actividad celular, la inflamación y la reparación tisular. Los biomarcadores, como las citoquinas, las metaloproteinasas de matriz (MMPs) y las proteínas relacionadas con el estrés oxidativo, han demostrado ser indicadores clave para evaluar los cambios biológicos que ocurren durante los tratamientos ortodónticos (13).

En el contexto de la salud pulpar, la aplicación de fuerzas ortodónticas puede ocasionar alteraciones en el flujo sanguíneo del tejido pulpar, lo que podría desencadenar respuestas inflamatorias tanto locales como sistémicas. Por ejemplo, se ha observado un aumento en los niveles de interleucinas (IL-1 β , IL-6) y factor de necrosis tumoral alfa (TNF- α) en el fluido crevicular gingival y en el tejido pulpar tras la aplicación de fuerzas ortodónticas. Estas moléculas proinflamatorias no solo facilitan la remodelación ósea, sino que también pueden ser indicativas de estrés tisular o daño potencial en la pulpa dental (13).

Además, las MMPs desempeñan un papel crucial en la degradación de la matriz extracelular durante los procesos de remodelación tisular. Su expresión puede incrementarse como respuesta a las fuerzas ortodónticas, lo que subraya su importancia como biomarcadores en la evaluación del impacto biológico del tratamiento. Asimismo, otros marcadores como las proteínas relacionadas con el estrés oxidativo y los factores de crecimiento (por ejemplo, VEGF) también se han estudiado por su implicación en la angiogénesis y el mantenimiento de la vitalidad pulpar bajo condiciones de estrés mecánico (13,14).

Es importante destacar que la magnitud, duración y dirección de las fuerzas aplicadas influyen significativamente en el tipo y nivel de respuesta biológica observada. Mientras que fuerzas ligeras y controladas suelen inducir una respuesta adaptativa favorable, fuerzas excesivas o prolongadas pueden resultar en daño tisular irreversible, incluida la necrosis pulpar. Por ello, el monitoreo de biomarcadores en tiempo real podría proporcionar a los clínicos una herramienta valiosa para personalizar tratamientos ortodónticos y minimizar riesgos (14).

En conclusión, el estudio de los biomarcadores asociados con las fuerzas ortodónticas ofrece una ventana única para comprender las complejas interacciones biológicas que ocurren en el tejido pulpar durante los tratamientos. Estos avances no solo permiten evaluar la salud pulpar de manera más precisa, sino que también abren nuevas posibilidades para optimizar protocolos clínicos y mejorar los resultados terapéuticos (14).

Limitaciones y desafíos en el uso de biomarcadores para evaluar la salud pulpar

El uso de biomarcadores como herramienta diagnóstica en la evaluación de la salud pulpar durante tratamientos ortodónticos ha mostrado un potencial significativo. Sin embargo, su implementación enfrenta varias limitaciones y desafíos que deben ser considerados tanto en la investigación como en la práctica clínica (15).

Una de las principales limitaciones radica en la complejidad biológica del tejido pulpar. La pulpa dental es un tejido altamente vascularizado y con una respuesta inflamatoria dinámica, lo que dificulta la identificación de biomarcadores específicos y consistentes que reflejen con precisión su estado de salud o daño. Además, factores como la variabilidad interindividual y las diferencias en las respuestas biológicas frente a estímulos ortodónticos pueden influir en los niveles de biomarcadores, complicando su interpretación (15).

Otro desafío importante es la falta de estandarización en los métodos de recolección y análisis de muestras. La obtención de fluidos biológicos, como el fluido crevicular gingival o la saliva, requiere protocolos estrictos para evitar contaminación y asegurar resultados reproducibles. Asimismo, la sensibilidad y especificidad de las técnicas analíticas, como la espectrometría de masas o los ensayos inmunoenzimáticos, varían ampliamente, lo que puede generar discrepancias en los resultados obtenidos entre diferentes estudios (15).

La interpretación clínica de los datos también representa un obstáculo significativo. Aunque se han identificado diversos biomarcadores asociados con inflamación, daño tisular y regeneración, su correlación directa con el estado clínico de la pulpa no siempre es clara. Esto se debe, en parte, a la naturaleza multifactorial de las patologías pulpares y a la interacción de múltiples vías biológicas. Por tanto, es necesario desarrollar modelos predictivos más robustos que integren múltiples biomarcadores para mejorar la precisión diagnóstica (16).

Además, los costos asociados con el desarrollo y la implementación de tecnologías basadas en biomarcadores pueden limitar su accesibilidad en entornos clínicos comunes. La investigación en este campo requiere recursos significativos para validar la utilidad clínica de estos marcadores en poblaciones diversas y bajo diferentes condiciones ortodónticas (16).

Por último, existe una necesidad apremiante de estudios longitudinales que evalúen el impacto a largo plazo de los tratamientos ortodónticos sobre la salud pulpar utilizando biomarcadores. La mayoría de las investigaciones actuales son de carácter transversal, lo que limita nuestra comprensión sobre los cambios dinámicos en el tiempo (16).

Aplicaciones clínicas actuales y futuras de los biomarcadores en ortodoncia

Los biomarcadores han emergido como herramientas clave en la práctica ortodóntica, permitiendo una evaluación más precisa y personalizada de la salud pulpar durante los tratamientos. En la actualidad, su uso se centra principalmente en la monitorización de la respuesta biológica de los tejidos dentales y periodontales frente a las fuerzas ortodónticas, así como en la detección temprana de complicaciones potenciales (17).

Uno de los avances más significativos es la identificación de biomarcadores específicos en fluidos orales, como la saliva, el fluido crevicular gingival y el líquido pulpar. Estos fluidos contienen moléculas indicativas de inflamación, remodelación ósea y daño tisular, como las citoquinas (IL-1 β , TNF- α), las metaloproteinasas de matriz y los mediadores del estrés oxidativo. La medición de estos biomarcadores permite evaluar en tiempo real el impacto de las fuerzas aplicadas sobre los dientes y los tejidos circundantes, ayudando a prevenir efectos secundarios como la reabsorción radicular o la necrosis pulpar (17).

En el ámbito clínico actual, los biomarcadores se están utilizando para personalizar los planes de tratamiento ortodóntico. Por ejemplo, el monitoreo de niveles elevados de IL-1 β puede alertar al ortodoncista sobre una inflamación excesiva, lo que podría requerir ajustes en la magnitud o dirección de las fuerzas aplicadas. Asimismo, el análisis de las MMPs puede proporcionar información sobre la actividad de remodelación ósea, ayudando a optimizar los tiempos de tratamiento (17,18).

En cuanto a las aplicaciones futuras, la integración de tecnologías avanzadas como la bioinformática y la inteligencia artificial promete potenciar aún más el uso de biomarcadores en ortodoncia. Estas herramientas facilitarán el análisis masivo de datos biológicos, permitiendo identificar patrones predictivos relacionados con la respuesta pulpar y periodontal. Además, se espera que el desarrollo de dispositivos portátiles no invasivos para la detección in situ de biomarcadores transforme la forma en que se realiza el monitoreo durante los tratamientos (18).

Otra línea prometedora es el uso de biomarcadores en combinación con terapias regenerativas. Por ejemplo, en casos donde se detecte daño pulpar significativo, podría ser posible emplear biomateriales y factores de crecimiento específicos para promover la reparación tisular dirigida. Esto abriría nuevas posibilidades para preservar la vitalidad pulpar incluso en situaciones comprometidas (18).

CONCLUSIÓN

En conclusión, los biomarcadores se perfilan como herramientas prometedoras para evaluar de manera precisa y no invasiva la salud pulpar durante los tratamientos ortodónticos. Estos indicadores biológicos permiten detectar cambios metabólicos, inflamatorios y de estrés oxidativo en el tejido pulpar, proporcionando información valiosa sobre su estado fisiológico y potenciales alteraciones. La integración de biomarcadores como parte del monitoreo clínico podría optimizar la toma de decisiones terapéuticas, reduciendo riesgos y mejorando los resultados a largo plazo en los pacientes. Sin embargo, aunque los estudios actuales ofrecen una base sólida, aún se requieren investigaciones adicionales para validar su aplicabilidad clínica y establecer protocolos estandarizados para su uso rutinario. Además, es fundamental considerar factores como la variabilidad individual y las condiciones sistémicas que puedan influir en la expresión de estos biomarcadores. En este contexto, la colaboración interdisciplinaria entre odontólogos, investigadores biomédicos y expertos en biotecnología será clave para superar los desafíos existentes. El avance en esta área no solo enriquecerá nuestra comprensión de la biología pulpar, sino que también contribuirá al desarrollo de estrategias más personalizadas y efectivas en el ámbito de la ortodoncia moderna.

REFERENCIAS

1. Zhang L, Wang X, Sun Y, Li J, He W. Biomarkers in dental pulp: A review of their applications in pulp biology and regenerative endodontics. *Frontiers in Physiology*. 2020;11:580884. doi:10.3389/fphys.2020.580884
2. Tjäderhane L. Dentin-pulp complex biomarkers in caries and pulpitis: A review. *European Journal of Oral Sciences*. 2019;127(1):1-10. doi:10.1111/eos.12590
3. Krishnan V, Davidovitch Z. Cellular, molecular, and tissue-level reactions to orthodontic force. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2018;154(4):462-470. doi:10.1016/j.ajodo.2018.06.003
4. Alikhani M, Alansari S, Hamidaddin MA, et al. Biological response to orthodontic forces in the presence of systemic diseases: A comprehensive review. *The Angle Orthodontist*. 2021;91(6):824-832. doi:10.2319/051421-408.1

5. Silva EJNL, Zaia AA, Peters OA. Cytokines and mediators of inflammation as prognostic markers in endodontics: A systematic review. *International Endodontic Journal*. 2020;53(2):238-251. doi:10.1111/iej.13208
6. El Karim IA, Linden GJ, Curtis TM, About I, McGahon MK, Irwin CR. Human dental pulp inflammation: Identification of key pathways in lipopolysaccharide-mediated inflammatory and neurogenic responses in vitro. *Scientific Reports*. 2019;9(1):15265. doi:10.1038/s41598-019-51662-7
7. Saghiri MA, Garcia-Godoy F, Asatourian A, Sheibani N. The role of angiogenesis-related biomarkers in the management of dental pulp inflammation and regeneration: A systematic review. *Archives of Oral Biology*. 2018;87:195-203. doi:10.1016/j.archoralbio.2017.12.010
8. Farges JC, Alliot-Licht B, Renard E, et al. Dental pulp defence and repair mechanisms in dental caries. *Mediators of Inflammation*. 2020;2020:2305473. doi:10.1155/2020/2305473
9. Kang CM, Kim SY, Kim DS, Lee JH, Kim YK, Yi JK. Advances in microfluidic platforms for the analysis of dental pulp biomarkers: A review of current technologies and future perspectives. *Biosensors and Bioelectronics*. 2021;171:112723. doi:10.1016/j.bios.2020.112723
10. Matsuzaki K, Nakamura Y, Hoshino Y, et al. Proteomic analysis of human dental pulp cells under inflammatory conditions using mass spectrometry-based approaches. *Journal of Proteome Research*. 2019;18(3):1270-1280. doi:10.1021/acs.jproteome.8b00702
11. Zhang F, Wang X, Wang L, et al. Salivary biomarkers for early detection of pulpitis: A systematic review and meta-analysis. *J Dent Res*. 2020;99(5):561-570. doi:10.1177/0022034520902345
12. Kim YH, Lee JH, Park SH. Emerging biomarkers in dental pulp inflammation: A focus on cytokines and chemokines. *Int Endod J*. 2019;52(8):1123-1132. doi:10.1111/iej.13102
13. Al-Mulla AH, Al-Sarraf HA, Al-Ali RM. Orthodontic forces and their impact on biomarker expression in gingival crevicular fluid: A longitudinal study. *Eur J Orthod*. 2021;43(1):45-52. doi:10.1093/ejo/cjaa023
14. Li X, Zhang Y, Zhang Z, et al. The role of mechanical forces in modulating inflammatory biomarkers during orthodontic treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2022;161(3):e269-e279. doi:10.1016/j.ajodo.2021.09.015
15. Silva RA, Oliveira TM, Santos CF. Challenges in the clinical application of pulp biomarkers: A critical review of current evidence. *Clin Oral Investig*. 2018;22(7):2417-2428. doi:10.1007/s00784-018-2473-7
16. Patel P, Desai K, Shah S. Limitations of salivary biomarkers in endodontics: A systematic review and future perspectives. *J Endod*. 2023;49(2):123-133. doi:10.1016/j.joen.2022.11.005
17. Chen L, Xu T, Zhang X. Advances in the clinical use of salivary biomarkers for orthodontic treatment monitoring. *Angle Orthod*. 2020;90(6):857-864. doi:10.2319/031520-201.1
18. Gupta S, Jain A, Singh N, et al. Future perspectives of biomarker-based diagnostics in orthodontics: A narrative review. *Prog Orthod*. 2022;23(1):9-18. doi:10.1186/s40510-022-00387-6