



Facultad de Odontología

Posgrado de Endodoncia

Tema:

Precisión de guías quirúrgicas en cirugía apical guiada: estudio comparativo in vitro

Tesis para la obtención del Título de “Especialista en Endodoncia”

Presentada por:

Nancy Soraya Romero Mora

Tutor:

Dra. María Soledad Peñaherrera Manosalvas

Quito, septiembre de 2025

Resumen

Este estudio evaluó la precisión de las trepanaciones en cirugía apical en modelos estereolitográficos, comparando el uso de guías quirúrgicas diseñadas mediante los *software* Blue Sky Plan y Exoplan frente a la técnica convencional. Se desarrolló un estudio comparativo *in vitro* utilizando archivos DICOM y STL alineados en puntos anatómicos clave, lo que permitió diseñar 16 guías quirúrgicas con ventanas de verificación y *sleeves* metálicos para trepanos de 4,45 mm. Las guías se aplicaron en 72 raíces distribuidas en 12 mandíbulas estereolitográficas, organizadas en tres grupos: control, guías de Blue Sky Plan y guías de Exoplan.

Se evaluaron tres variables: estabilidad, precisión y tiempo de trepanación. La estabilidad se determinó observando desplazamientos tras la instalación; la precisión se midió superponiendo imágenes CBCT pre y postoperatorias para calcular la desviación respecto a un objetivo de 3 mm; el tiempo se registró desde el inicio hasta la finalización de la trepanación.

En los resultados, Blue Sky Plan presentó un 50 % de guías con movilidad $>0,5$ mm, frente al 12,5 % en Exoplan; aunque la prueba chi-cuadrado no mostró diferencias significativas, posiblemente por el tamaño muestral reducido. En precisión, Exoplan obtuvo la menor desviación promedio (0,17 mm), superando al control (1,16 mm) y a Blue Sky (0,55 mm), diferencia confirmada por la prueba de Kruskal-Wallis ($p = 0,000$). En cuanto al tiempo, Exoplan fue el más eficiente (106 s), seguido de Blue Sky (127 s) y el control (155 s), con diferencias estadísticamente significativas. No se encontró correlación entre precisión y duración, indicando que mayor exactitud no implica mayor tiempo operatorio.

Se concluye que Exoplan demostró un mejor rendimiento global, combinando mayor estabilidad, precisión y eficiencia, frente al método convencional y Blue Sky Plan. Sin embargo, el tamaño limitado de la muestra sugiere que estos hallazgos deben considerarse preliminares y validarse en estudios con mayor número de casos.

Estos resultados respaldan el potencial de la cirugía apical guiada como herramienta para optimizar la seguridad, la predictibilidad y la eficiencia de los procedimientos endodónticos.

Palabras claves: Tomografía Computarizada de Haz Cónico, impresión 3D, apicectomía, Cirugía Asistida por Computador, programas informáticos, endodoncia

Declaración de Aceptación de Norma Ética y Derechos

El presente documento se ciñe a las normas éticas y reglamentarias de la Universidad Hemisferios. Así, declaro que lo contenido en este ha sido redactado con entera sujeción al respeto de los derechos de autor, citando adecuadamente las fuentes. Por tal motivo, autorizo a la Biblioteca a que haga pública su disponibilidad para lectura dentro de la institución, a la vez que autorizo el uso comercial de mi obra a la Universidad Hemisferios, siempre y cuando se me reconozca el cuarenta por ciento (40%) de los beneficios económicos resultantes de esta explotación.

Además, me comprometo a hacer constar, por todos los medios de publicación, difusión y distribución, que mi obra fue producida en el ámbito académico de la Universidad Hemisferios.

De comprobarse que no cumplí con las estipulaciones éticas, incurriendo en caso de plagio, me someto a las determinaciones que la propia Universidad plantee.



Nancy Soraya Romero Mora

C.I. 172513815

Dedicatoria

En primer lugar, a Dios, quien con su amor infinito ha sido fundamental para alcanzar cada objetivo que me he propuesto. A mi madre, María, le debo prácticamente el cielo. Su apoyo incondicional, impulso constante y su fe en mí han sido clave para culminar esta etapa. Gracias por sostenerme en cada decisión y celebrar mis logros como si fueran tuyos.

A mis hermanas, Adriana y Sonia, mis tíos Alexandra, Patricio, Danilo, y a todos mis familiares y amigos, que han estado presentes; ya sea brindándome motivación, apoyo emocional o colaborando como pacientes en mi práctica preprofesional, gracias de corazón. Sin ustedes, esto no habría sido posible.

Además, no puedo dejar de mencionar a quien ha sido un pilar inquebrantable en este período, mi amado David. Tu mano amiga, tus palabras de aliento, tu cariño y tu respaldo transformaron mis inseguridades y frustraciones en cargas más livianas. Gracias por creer en mí incluso cuando yo misma dudaba.

Este trabajo de titulación no solo representa más que dos años de esfuerzo académico; es el resultado de sueños, sacrificios y crecimiento personal. Reconozco mi propio compromiso, la responsabilidad con la que enfrenté cada día, la creatividad y el corazón que puse en cada tarea, en cada clase. Valorarme a mí misma y sentir satisfacción por lo logrado es una de las mayores recompensas.

Finalmente, mi más profundo agradecimiento a mi tutora, la doctora Soledad, quien fue más que una guía, una segunda madre, amiga y un faro constante en este capítulo de mi vida. Su paciencia y calidez marcaron significativa en mi formación. Asimismo, extendiendo mi gratitud a todos mis maestros del posgrado, a quienes aprecio y admiro profundamente, pues han dejado una huella imborrable en mi camino profesional y personal.

Índice

Resumen	2
Declaración de Aceptación de Norma Ética y Derechos	4
Dedicatoria.....	5
Índice	6
Índice de figuras	7
Índice de tablas	8
Resumen	9
Abstract.....	11
Introducción.....	13
Materiales y métodos.....	17
Resultados.....	27
Discusión	33
Conclusiones.....	37
Referencias	38

Índice de figuras

Figura 1. Ficha técnica tomógrafo Hyperion X9	18
Figura 2. Diseño de guía quirúrgica con apoyos oclusales mediante el software Exoplan	19
Figura 3. Verificación de medidas del diámetro interno del tubo guía.....	20
Figura 4. <i>Axonometría tridimensional sleeve</i>	20
Figura 5. Trefina Ø 3,5mm y sleeve modificado para esta investigación.....	21
Figura 6. <i>Modelos y guías quirúrgicas estereolitográficas</i>	22
Figura 7. Fase experimental, apicectomías en G1, G2 y G3	24
Figura 8. Evaluación por superposición Tomográfica en Exocad.....	25
Figura 9. Distribución de resultados de estabilidad	28
Figura 10. Distribución de la diferencia e I.C para el promedio 95%	29
Figura 11. Distribución del tiempo e I.C para el promedio 95%.....	31
Figura 12. Relación diferencia vs tiempo según grupo	32

Índice de tablas

Tabla 1. Resultados de la estabilidad de las guías quirúrgicas G2 y G3.....	27
Tabla 2. Descriptivos de la diferencia en la trepanación apical planificada.....	28
Tabla 3: Descriptivos del tiempo operatorio en la trepanación apical.....	31

Precisión de guías quirúrgicas en cirugía apical guiada: estudio comparativo *in vitro*

Nancy Soraya Romero Mora

nsromerom@estudiantes.uhemisferios.edu.ec

Resumen

Este estudio evaluó la precisión de las trepanaciones en cirugía apical en modelos estereolitográficos, comparando el uso de guías quirúrgicas diseñadas mediante los *software* Blue Sky Plan y Exoplan frente a la técnica convencional.

Se desarrolló un estudio comparativo *in vitro* utilizando archivos DICOM y STL alineados en puntos anatómicos clave, lo que permitió diseñar 16 guías quirúrgicas con ventanas de verificación y *sleeves* metálicos para trefinas de 4,45 mm. Las guías se aplicaron en 72 raíces distribuidas en 12 mandíbulas estereolitográficas, organizadas en tres grupos: control, guías de Blue Sky Plan y guías de Exoplan.

Se evaluaron tres variables: estabilidad, precisión y tiempo de trepanación. La estabilidad se determinó observando desplazamientos tras la instalación; la precisión se midió superponiendo imágenes CBCT pre y postoperatorias para calcular la desviación respecto a un objetivo de 3 mm; el tiempo se registró desde el inicio hasta la finalización de la trepanación.

En los resultados, Blue Sky Plan presentó un 50 % de guías con movilidad $>0,5$ mm, frente al 12,5 % en Exoplan; aunque la prueba chi-cuadrado no mostró diferencias significativas, posiblemente por el tamaño muestral reducido. En precisión, Exoplan obtuvo la menor desviación promedio (0,17 mm), superando al control (1,16 mm) y a Blue Sky (0,55

mm), diferencia confirmada por la prueba de Kruskal-Wallis ($p = 0,000$). En cuanto al tiempo, Exoplan fue el más eficiente (106 s), seguido de Blue Sky (127 s) y el control (155 s), con diferencias estadísticamente significativas. No se encontró correlación entre precisión y duración, indicando que mayor exactitud no implica mayor tiempo operatorio.

Se concluye que Exoplan demostró un mejor rendimiento global, combinando mayor estabilidad, precisión y eficiencia, frente al método convencional y Blue Sky Plan. Sin embargo, el tamaño limitado de la muestra sugiere que estos hallazgos deben considerarse preliminares y validarse en estudios con mayor número de casos. Estos resultados respaldan el potencial de la cirugía apical guiada como herramienta para optimizar la seguridad, la predictibilidad y la eficiencia de los procedimientos endodónticos.

Palabras claves: Tomografía Computarizada de Haz Cónico, impresión 3D, apicectomía, Cirugía Asistida por Computador, programas informáticos, endodoncia.

Abstract

This study evaluated the accuracy of trephinations in apical surgery on stereolithographic models, comparing the use of surgical guides designed with Blue Sky Plan and Exoplan *software* versus the conventional technique.

A comparative study *in vitro* was conducted using DICOM and STL files aligned at key anatomical landmarks, allowing the design of 16 surgical guides with verification windows and metallic *sleeves* for 4.45 mm trephines. The guides were applied to 72 roots distributed across 12 stereolithographic mandibles, organized into three groups: control, Blue Sky Plan guides, and Exoplan guides.

Three variables were assessed: stability, accuracy, and trephination time. Stability was determined by observing any displacement after guide placement; accuracy was measured by superimposing pre- and postoperative CBCT images to calculate deviation from a 3 mm target; time was recorded from the start to the completion of the trephination.

In the results, Blue Sky Plan exhibited 50% of guides with mobility >0.5 mm, compared with 12.5% for Exoplan; however, the chi-square test revealed no statistically significant differences, possibly due to the small sample size. Regarding accuracy, Exoplan achieved the lowest mean deviation (0.17 mm), outperforming the control group (1.16 mm) and Blue Sky (0.55 mm), with differences confirmed by the Kruskal-Wallis test ($p = 0.000$). In terms of time, Exoplan was the most efficient (106 s), followed by Blue Sky (127 s) and the control group (155 s), with statistically significant differences. No correlation was found between accuracy and duration, indicating that higher precision does not entail longer operative times.

It is concluded that Exoplan demonstrated superior overall performance, combining greater stability, accuracy, and efficiency compared with both the conventional method and BlueSky Plan. Nevertheless, the limited sample size suggests these findings should be considered preliminary and validated through studies with larger cohorts. These results support the potential of guided apical surgery as a tool to optimize safety, predictability, and efficiency in endodontic procedures.

Keywords: 3D printing, Cone-Beam Computed Tomography, apicoectomy, Surgery, Computer-Assisted, software, endodontics.

Introducción

La odontología contemporánea se enfoca cada vez más hacia procedimientos mínimamente invasivos, con la finalidad de reducir la morbilidad y acelerar la recuperación de los pacientes. En este contexto, los procedimientos quirúrgicos, como la cirugía periapical, representan un desafío notable debido a la proximidad de estructuras anatómicas críticas y al limitado espacio donde se localiza la afección (Jain et al., 2020; Anderson et al., 2018).

Con la finalidad de superar estas limitaciones, los avances tecnológicos han propiciado el desarrollo de herramientas de apoyo como lupas, microscopios, instrumental microquirúrgico y métodos diagnósticos como la tomografía computarizada de haz cónico (CBCT). Estas herramientas optimizan la orientación durante las intervenciones, incluso facilitan el trabajo, no obstante, para operadores con poca experiencia, la interpretación de las imágenes tomográficas mientras se ejecuta el tratamiento manualmente puede representar una dificultad considerable (Setzer, 2022; Giacomino et al., 2018).

En respuesta a estos retos, en el año 2016 emerge la endodoncia guiada (EG), una modalidad terapéutica que integra la información de la CBCT, escaneo intraoral y modelado tridimensional (3D), permitiendo la planificación digital del tratamiento endodóntico y el diseño de guías quirúrgicas asistidas por computadora, inicialmente desarrolladas para la colocación de implantes (Zehnder et al., 2016; Connert et al., 2016; Kuhl, et al., 2015). La EG surgió principalmente para resolver los inconvenientes que generaban los conductos pulpares obliterados (Kraatz et al., 2016). Sin embargo, varios de los autores que empezaron a investigarla, notaron su gran potencial, ampliando rápidamente su campo de utilidad hacia procedimientos de microcirugía endodóntica, permitiendo una exploración y planificación digital preoperatoria más precisa y eficiente, ofreciendo mayor control y seguridad en la ejecución clínica (Kim, 2021; Connert, 2022).

Uno de los principales aportes de la EG es la reducción del riesgo de iatrogenias, como perforaciones o desviaciones en la trayectoria, mediante la creación de una vía de ingreso predefinida, que dirige un instrumento puntualmente hacia el conducto radicular, favoreciendo la instrumentación, entre otros como el acceso a la porción apical de las raíces. De esta manera, se logran resultados más predecibles e independientes de la experiencia del operador (Anderson, 2018). Además de reducir significativamente los tiempos operatorios (Zehnder et al., 2016; Connert et al., 2019).

A partir de estas consideraciones, se formula la pregunta central de esta investigación: ¿El uso de guías quirúrgicas diseñadas mediante el *software* Blue Sky Plan y Exoplan ofrece ventajas en estabilidad, precisión y eficiencia en comparación con la técnica convencional de cirugía apical? con lo cual se busca generar evidencia experimental, que aporte criterios sólidos sobre la utilidad de estas tecnologías y su aplicabilidad clínica.

Desarrollo de la endodoncia guiada

La práctica de la endodoncia guiada comprende actualmente dos modalidades: endodoncia guiada estática (EGE) y endodoncia guiada dinámica (EGD). Ambas requieren la integración de archivos Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM), que constituyen una recopilación de imágenes obtenidas a través de una tomografía, permitiendo una visualización tridimensional detallada de las estructuras dentales y óseas (Gambarini et al., 2018). Esta base diagnóstica se complementa con registros digitales en formato (STL) por sus siglas en inglés *Stereolithography*, derivados de escaneos intraorales, que ofrecen un modelo tridimensional preciso de la superficie dentaria (Turkyilmaz, 2021). Dicha topografía escaneada resulta en una malla triangular, con triángulos de diferente tamaño, ubicados mediante un algoritmo tridimensional de coordenadas para generar un modelo informático de las estructuras a valorar, según las necesidades del caso clínico (Coachman et al., 2020).

La información obtenida de la tomografía como del escaneo se superponen mediante un *software*, que permite diseñar plantillas tridimensionales ajustadas al diente de interés y otros adyacentes para generar estabilidad de la guía (Moreno et al., 2020). El diseño se adapta a la naturaleza de la intervención, pudiendo ir desde perforaciones con diámetro y angulación definidas para acceder directamente a conductos calcificados (Connert et al., 2017), hasta plantillas más sofisticadas que incorporen tubos guía y *sleeves* (anillos) metálicos internos que dirigen la resección del ápice radicular y aseguran mayor exactitud (Won Ha et al., 2025).

Al completar los diseños, el archivo se exporta desde el *software* de planificación en formato STL para su posterior impresión 3D. Antes de su uso, es indispensable verificar el asentamiento de la guía sobre la superficie oclusal y confirmar su estabilidad, lo que asegura un ajuste adecuado a la anatomía del paciente (Van der Meer et al., 2016)

En este proceso, la elección del *software* de planificación juega un papel determinante. Existen plataformas de código cerrado, como Simplant y Exocad, que requieren licencias comerciales y no permiten modificaciones por parte del usuario (Zubizarreta, 2016); en contraste, los programas de código abierto, como Blue Sky Plan, ofrecen mayor flexibilidad, adaptabilidad y a menudo, se distribuyen gratuitamente (Zubizarreta, 2020). Esta elección no solo influye en el diseño de las guías, sino también, en su precisión final y en la experiencia del operador.

Por otra parte, la modalidad dinámica EGD, integra el uso de la CBCT con marcadores intraorales como referencia que se colocan en el lado opuesto a la zona quirúrgica, junto con sistemas de navegación asistida por cámaras estereoscópicas. Estos dispositivos permiten rastrear en tiempo real la trayectoria de los instrumentos a través de las estructuras dentales. Proyectando la información en un monitor, que permitir al operador

ajustar la dirección y profundidad de trabajo durante la intervención, según sea necesario (Connert et al, 2022).

El empleo de estas tecnologías en cirugía apical busca optimizar la exactitud, minimizar complicaciones y aumentar la tasa de éxito del tratamiento, como lo han demostrado estudios recientes (Ribeiro, 2022; Zehnder *et al.*, 2016; Connert *et al.*, 2017).

No obstante, la literatura aún reporta resultados heterogéneos y en ocasiones contradictorios (Buchgreitz *et al.*, 2016), lo que resalta la necesidad de estudios más rigurosos en escenarios tanto experimentales como clínicos para validar su eficacia y aplicabilidad.

Materiales y métodos

La presente investigación se desarrolló mediante un diseño experimental y comparativo *in vitro*, utilizando guías quirúrgicas estáticas elaboradas en dos sistemas de planificación digital, posteriormente impresas en 3D para su aplicación en intervenciones de cirugía apical.

Se empleó una CBCT preoperatoria donada, proveniente de un tomógrafo Hyperion X9 (My ray), que opera con una corriente alterna de 220 voltios (V), una intensidad de radiación de 120 kilovoltios (kV) y 8 miliamperios (mA), con un tiempo de exposición de 15 segundos (s) con una rotación de 360° (grados). El campo de visión field of view (FOV) se estableció en Ø11x5 centímetros (cm), con un tamaño de voxel de 75 micras (μm) (véase la Figura 1).

Paralelamente, se registraron impresiones digitales completas de la arcada mandibular con un escáner intraoral PrimeScan (Dentsply Sirona, Alemania), generando archivos en formato STL.

Criterios de inclusión: arcadas con dentición permanente y completa, sin patología periapical y sin antecedentes de microcirugía apical.

Criterios de exclusión: arcadas con edentulismo parcial, presencia de patologías evidentes, antecedentes de tratamientos endodónticos o quirúrgicos previos y dientes deciduos.

Figura 1

Ficha técnica tomógrafo Hyperion X9



Nota. μSv = microsievert

Fuente: My Ray, 2023.

Diseño de guías quirúrgicas

Los archivos DICOM y STL fueron importados al *software* Blue Sky Plan y Exocad. El registro se efectuó siguiendo las instrucciones de los manuales correspondientes a cada programa de planificación 3D, utilizando tres puntos de referencia anatómicos: cúspide mesio-vestibular de los molares, cúspide de los caninos y borde incisal de los incisivos centrales. Cada registro se repitió cinco veces por el investigador principal y fue validado por un especialista para garantizar la calibración adecuada del modelo digital de trabajo en cada *software*.

Una vez emparejados los archivos STL y DICOM, se diseñaron guías quirúrgicas para el lado derecho como izquierdo, asentándose sobre la cortical ósea vestibular, con apoyos sobre las caras oclusales de los segundos molares inferiores hasta los incisivos centrales. Incluyeron ventanas de verificación de 3x6 milímetros (mm) sobre las crestas proximales de premolares y molares (Figura 2). Así como una ventana de abordaje quirúrgico circular o tubo guía de 4,8 mm de diámetro situada en vestibular, a nivel de los ápices de caninos, segundos premolares y raíces mesiales de primeros molares derecho e izquierdo (Figura 3), misma ventana que servirá para insertar un tubo guía de acero inoxidable también denominado en inglés *sleeve*.

Figura 2

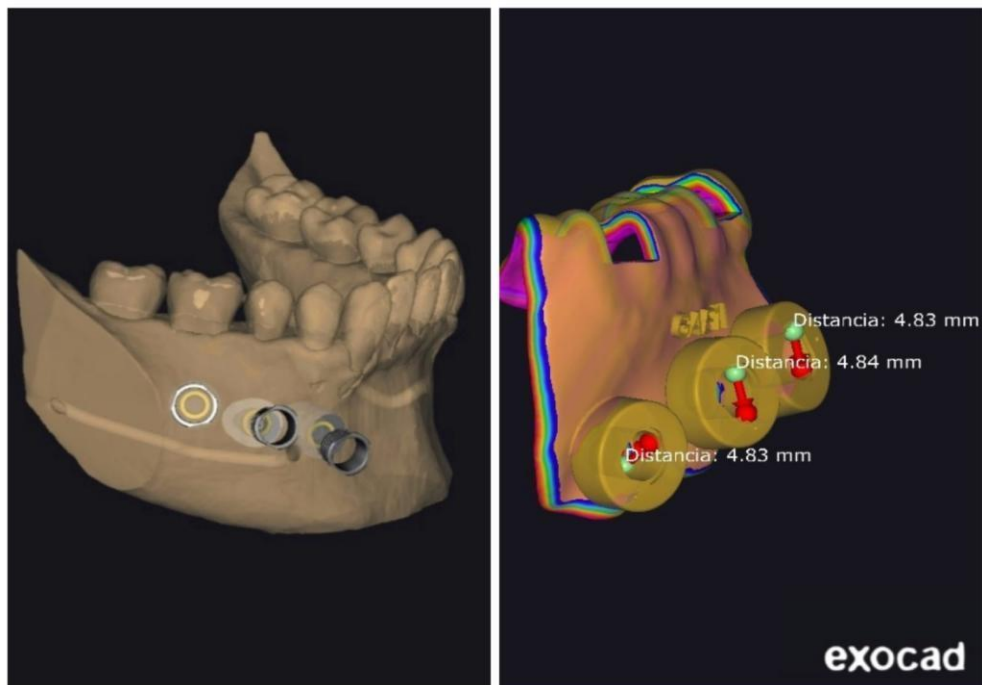
Diseño de guía quirúrgica con apoyos oclusales mediante el software Exocad



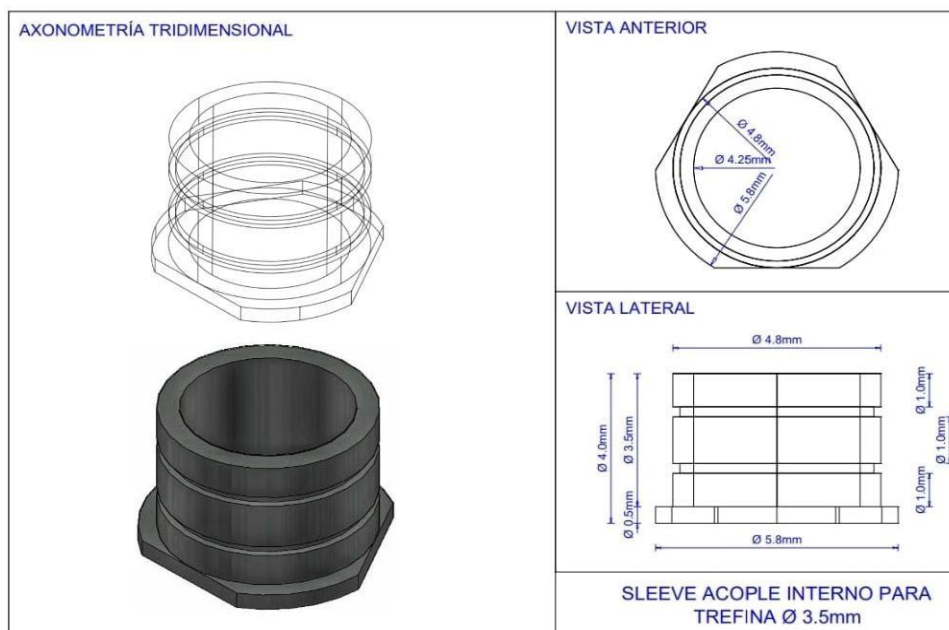
El *sleeve* metálico fue fabricado en un torno de control numérico por computadora (CNC), con un diámetro interno de 4,25mm, ajustado al diámetro externo de la trefina de 4,20 mm, para garantizar contacto íntimo entre ambas piezas y asegurar la precisión de ingreso. Esto disminuye el margen de desvío que generaría la fuerza de rozamiento de la parte activa con el tubo guía de resina y permite su rotación sin excesiva fricción (Figuras 4 y 5).

Figura 3

Verificación de medidas del diámetro interno del tubo guía

**Figura 4**

Axonometría tridimensional sleeve



Nota. Ø = diámetro.

Figura 5

Trefina Ø 3,5mm y sleeve modificado para esta investigación



Se utilizaron doce modelos mandibulares estereolitográficos, distribuidos en:

- Grupo 1 (G1, control) constituido por cuatro modelos, donde se realizó la cirugía apical sin la utilización de guías quirúrgicas.
- Grupo 2 (G2) con cuatro modelos y guías diseñadas con Blue Sky Plan.
- Grupo 3 (G3) con cuatro modelos y guías que emplearon el *software* Exocad.

En total se fabricaron dieciséis guías quirúrgicas con las especificaciones previamente mencionadas, ocho por cada grupo (*software* de planificación), impresas en resina (UV Cmprodemaq, Estados Unidos), con una impresora SprintRay Pro (Estados Unidos), junto con doce modelos estereolitográficos del maxilar inferior (Figura 6).

Figura 6

Modelos y guías quirúrgicas estereolitográficas



Además, se planteará un estudio piloto que incluirá dos biomodelos. De estos, el lado derecho se utilizará sin guía quirúrgica y el lado izquierdo incorporarán guías quirúrgicas, cada uno utilizando un *software* específico. Para así determinar la idoneidad de los cuerpos de prueba.

Evaluación de estabilidad

Cada guía, se asentó sobre el modelo y se aplicó presión en cuatro puntos: caras oclusales mesial y distal, cara vestibular a nivel óseo y la cara posterior de la guía, sitios donde se verificó presencia de movimiento o desalajo de la plantilla. Cualquier movilidad igual o superior a 0,5 mm en cualquiera de las direcciones será registrada con un signo (+), clasificándose como un fracaso; en contraste, si no se detecta movilidad significativa, se registrará con un signo (-) y se determinará éxito. La evaluación se realizó por dos examinadores independientes antes de iniciar la fase experimental.

Evaluación de precisión

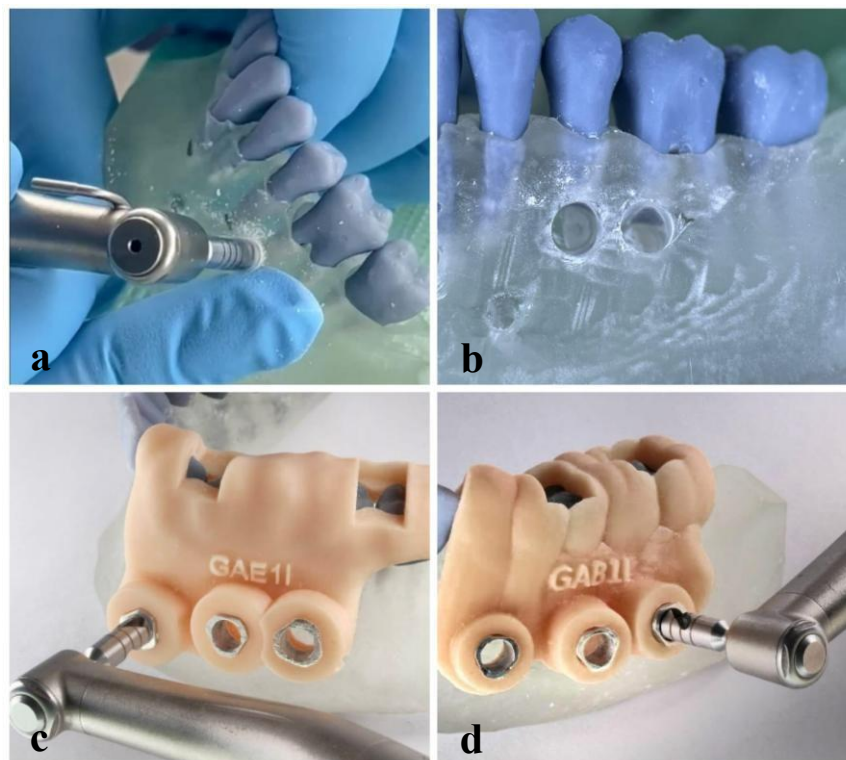
Durante la fase experimental, se contó con la colaboración de tres profesionales calibrados, quienes intervinieron aleatoriamente en los tres grupos. Para los procedimientos, se emplearon trefinas de 3,5 mm de diámetro interno, accionadas por un fisiodispenser NSK Surgic Pro (Japón) a una velocidad de 800 revoluciones por minuto (rpm) y con un torque de 40 Newton por centímetro (N/cm).

En G1o grupo control, se realizaron 24 orificios circulares en la región apical de los 3 dientes, derechos e izquierdos, en los cuatro modelos estereolitográficos sin la asistencia de guías quirúrgicas. Para ello, se calculó la distancia desde la unión amelocementaria (UCE) hasta 3 mm por encima del ápice radicular, basándose en una CBCT preoperatoria. Con el fin de aumentar la precisión, el operador utilizó una sonda periodontal para realizar la osteotomía y la resección de 3 mm en los ápices radiculares.

En G2 y G3, se colocarán un total de 16 guías quirúrgicas con diseño de tubos quirúrgicos sobre los ocho modelos, y se efectuaron 48 resecciones radiculares de forma similar, con las trefinas (Figura 7).

Figura 7

Fase experimental, apicectomías en G1, G2 y G3



Nota. (a) técnica de trepanación convencional; (b) resultado del grupo 1; (c) guía quirúrgica elaborada con el *software* Exoplan; (d) guía elaborada con Blue Sky plan.

Se realizó una CBCT de los modelos en cada grupo para medir tridimensionalmente la longitud de las raíces trepanadas. Esto permitió examinar posibles discrepancias entre el diseño 3D y el resultado posoperatorio final.

Mediante la superposición de las imágenes tomográficas pre y posoperatorias, se cuantificó la longitud de resección de los ápices radiculares en milímetros, definida como la distancia desde el ápice radicular en la imagen tomográfica inicial hasta el centro del área reseçada en la imagen tomográfica final, utilizando el *software* CAD (Exocad, GmbH, Darmstadt, Alemania) (Figura 8).

Un evaluador entrenado llevó a cabo una medición doble de la longitud reseçada, con un intervalo de una semana entre mediciones, con el propósito de asegurar una evaluación imparcial e independiente de las mediciones anteriores. Se calculó el promedio de los dos valores obtenidos para el análisis final.

Figura 8

Evaluación por superposición Tomográfica en Exocad



Recolección y análisis de datos

Los resultados se organizaron en tres tablas en Excel:

- Tabla 1: estabilidad de las guías, expresada con signos positivos o negativos (+, -); éxito y fracaso.
- Tabla 2: precisión de resección en milímetros (mm).
- Tabla 3: tiempo operatorio en segundos (s).

En total, se analizaron 64 puntos de presión para estabilidad y 72 mediciones de resección radicular (24 por grupo) y se evaluó si existe correlación con la variable tiempo.

Análisis estadístico

Se calculó el coeficiente de correlación intraclase (CCI) para proporcionar confiabilidad intraobservador durante la evaluación milimétrica de la longitud reseçada. Para el análisis estadístico, se empleó la prueba de Kruskal-Wallis.

Finalmente, todos los datos se analizaron utilizando el *software* libre R v.4.4.2 donde se presentó los valores descriptivos básicos de cada variable, tanto a nivel de tablas como gráficas, de igual manera se utilizó para contrastar diferencias significativas, técnicas como intervalos de confianza para promedios (al 95%) construidos con *t-Student* y el programa estadístico SPSS, aplicando las pruebas ANOVA y chi-cuadrado.

Resultados

Tras la recolección y clasificación de datos, se realizaron evaluaciones estadísticas obtenido lo siguiente:

Evaluación de estabilidad

Durante la prueba de estabilidad, en el grupo 2 correspondiente a Blue Sky Plan de las 8 guías quirúrgicas que se probaron 4 presentaron movilidad mayor a 0,5 mm lo que se determina como fracaso, esto representa al 50% de su grupo.

La prueba en el grupo 3 Exoplan de las 8 guías, únicamente una de ellas presentó movilidad mayor a 0,5 mm lo que representa el 12.5% de fracasos (Tabla 1).

Tabla 1

Resultados de la estabilidad de las guías quirúrgicas G2 y G3

Grupo	Modelos	(+) Fracasos	Proporción (%)	I.C. 95%
G1 Control	8	0	0.0	-
G2 Blue Sky Plan	8	50.0	50.0	21.5 – 78.5
G3 Exoplan	8	12.5	12.5	0.7 – 53.3

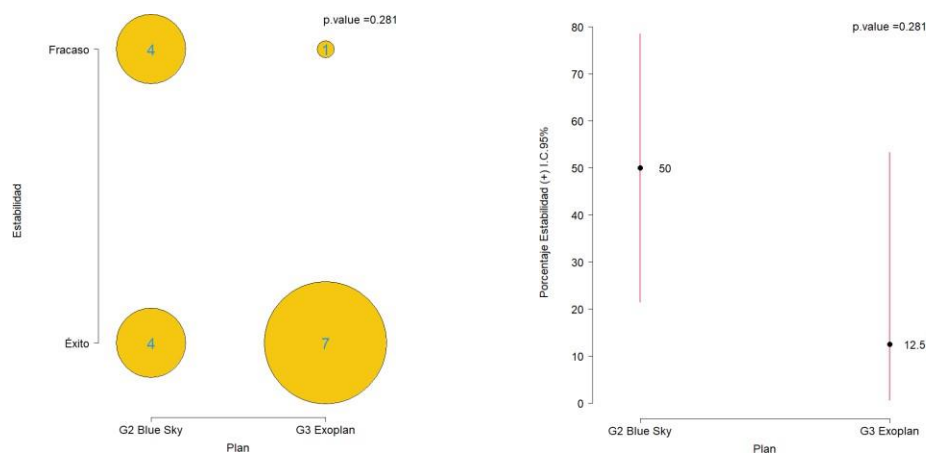
Nota. Prueba chi-cuadrado: $p > 0,05$ (sin diferencias estadísticamente significativas)

En la prueba chi cuadrado de independencia ($p > 0.05$) permite concluir que existe independencia entre los resultados de estabilidad y el plan utilizado; además los intervalos de confianza al 95% para la proporción de fracasos muestra cómo Blue Sky Plan presenta un mayor porcentaje de fracasos (Figura 9).

Sin embargo, debido al tamaño de la muestra, se concluye que no hay diferencias significativas entre estos dos grupos.

Figura 9

Distribución de resultados de estabilidad



Evaluación de precisión y tiempo

El cálculo de la longitud fue medido por la distancia desde la unión amelocementaria hasta 3 mm por encima del ápice radicular, basándose en una CBCT preoperatoria. Se evaluó la diferencia de la medición realizada respecto de los 3mm de referencia (Tabla 2).

Tabla 2

Descriptivos de la diferencia en la trepanación apical planificada

Grupo	Muestras	Mínimo	Máximo	Mediana	Promedio	DE	CV
G1 Control	24	-0.77	3.14	1.16	1.09	0.82	75.4
G2 Blue Sky Plan	24	-0.13	2.27	0.81	0.83	0.58	69.7
G3 Exoplan	23*	-0.04	0.80	0.18	0.17	0.20	115.1

Nota. Prueba de Kruskal Wallis: $p = 0,000$ (diferencias significativas). * Se excluyó una muestra de G3 por fractura del cilindro de resina de la guía quirúrgica

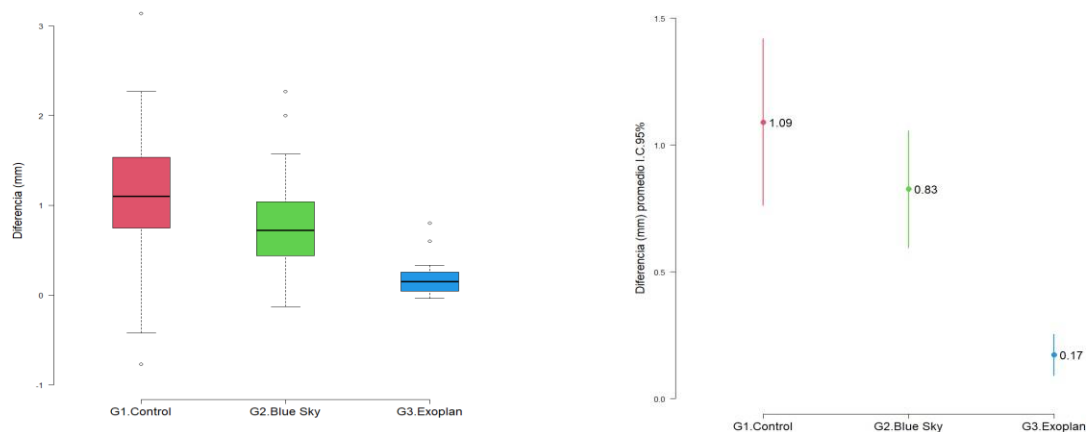
En el grupo control G1 con la muestra de 24 resecciones, se obtuvo una mínima de -0.77 mm lo que significa, que de los 3mm esperados apenas se secciono 2.23 mm, mientras que su máxima fue de 3.14 mm entendiéndose como una resección de 6.14 mm. En promedio la resección fue de 1.16mm más que el estándar de 3mm, la que significó una desviación estándar de 0.82mm.

El grupo G2 por su parte también con una muestra de 24 resecciones, se obtuvo una mínima de -0.13 mm y una máxima de 2.27 mm, más de los 3mm planificados. En promedio 0.55 mm, lo que significa una desviación estándar de 0.58.

El grupo 3 con una muestra de 23, se excluyó una de las resecciones debido a la fractura del cilindro de resina que sostenía al *sleeve* metálico. Los resultados obtenidos en su mínima son de -0.04 mm y una máxima de 0.80 mm. En promedio se obtuvo un valor de 0.17 mm, lo que significa una desviación estándar de 0.20 (Figura 10).

Figura 10

Distribución de la diferencia e I.C para el promedio 95%



Se observa que el grupo control presentó las mayores diferencias respecto a la planificación, seguido por el grupo G2, mientras que el grupo G3 mostró las discrepancias más reducidas.

Las representaciones gráficas (box plot) y los intervalos de confianza al 95% para la diferencia promedio, confirman la tendencia descrita en la tabla previa.

El análisis estadístico mediante la prueba Kruskal-Wallis revela que ($p = 0.000$) evidenció diferencias significativas entre los promedios y desviación estándar de los grupos. Siendo G1 el más alejado de la planificación en comparación con G2 y G3. Aunque los grupos con guías quirúrgicas G2 y G3 mostraron valores más próximos a la planificación, también se identificaron diferencias significativas entre ellos. De acuerdo con los intervalos de confianza, el software Exoplan (G3) obtuvo los resultados de mayor precisión y menor variabilidad.

Evaluación de tiempo

Se identificó una tendencia similar en relación con el tiempo operatorio. La prueba Kruskal-Wallis ($p = 0.000$) confirmó diferencias estadísticamente significativas entre los tres grupos. En G1, el tiempo osciló entre 96 y 238 segundos, con un tiempo promedio o mediana de 154.63 s y una desviación estándar de 38.57s.

El grupo G2 registró tiempo menores en comparación con G1, con valores entre 59 y 181 segundos, una mediana de 132.10s y desviación estándar en 34.04s y G3 mostró los valores más reducidos con un rango entre 54 y 135 segundos, una mediana de 114.80 s y desviación estándar de 38.57s (Tabla 3) (Figura 11).

Tabla 3

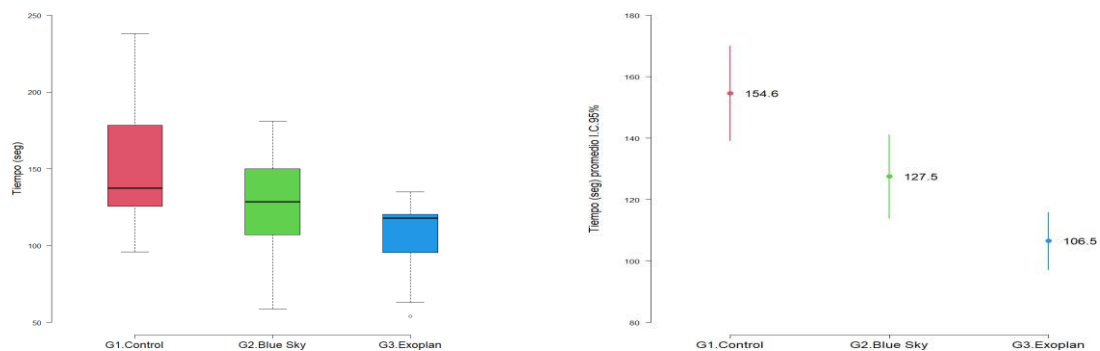
Descriptivos del tiempo operatorio en la trepanación apical

Grupo	Muestras	Mínimo	Máximo	Mediana	Promedio	DE	CV (%)
G1 Control	24	96.0	238.0	150.6	154.6	38.6	24.9
G2 Blue Sky	24	59.0	181.0	132.1	127.5	34.0	26.7
Plan							
G3 Exoplan	23*	54.0	135.0	114.8	106.5	22.8	21.4

Nota. Prueba de Kruskal Wallis: $p = 0,000$ (diferencias significativas).

Figura 11

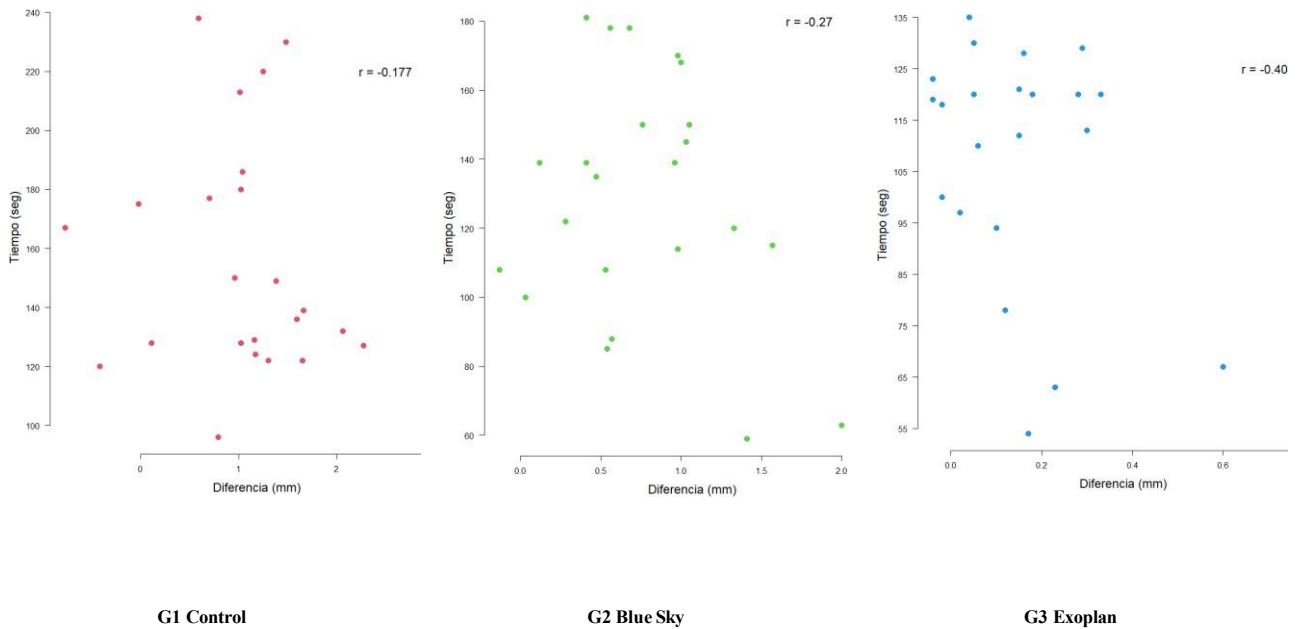
Distribución del tiempo e I.C para el promedio 95%



Complementariamente, se evalúa la correlación entre diferencia y tiempo notándose valores bajos y estadísticamente nulos ($p > 0.05$); es decir, la diferencia y el tiempo se muestran independientes (Figura 12).

Figura 12

Relación diferencia vs tiempo según grupo



La prueba Kruskal-Wallis ($p = 0.000$) evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los grupos, siendo G1 el más alejado de la planificación en comparación con G2 y G3. Aunque estos últimos mostraron valores más cercanos entre sí, también presentaron diferencias significativas. Los intervalos de confianza muestran que las guías diseñadas en Exoplan presentaron la menor magnitud de error.

A partir de estos hallazgos, se sugiere la implementación de guías quirúrgicas en cirugía apical como una estrategia en procedimientos de cirugía apical, buscando optimizar los resultados clínicos y fortalecer la seguridad en la práctica endodóntica.

Discusión

Los resultados del presente estudio demuestran que las guías quirúrgicas para cirugía apical guiada presentan un alto nivel de precisión en un entorno in vitro, con desviaciones lineales reducidas con respecto a la planificación digital. Este hallazgo es consistente con lo reportado por (Ha et al., 2025), quienes, en un estudio cadavérico, evidenciaron que un diseño optimizado de guía tridimensional puede minimizar los errores de osteotomía y resección radicular, mejorando la reproducibilidad del procedimiento.

La evidencia científica disponible respalda de manera consistente la efectividad de la endodoncia guiada, tanto en accesos coronales como en microcirugía. (Zehnder et al., 2016) introdujeron la técnica de endodoncia guiada estática para cavidades de acceso, demostrando desviaciones menores a 1 mm, valores concordantes con los obtenidos en este trabajo. De forma similar (Moreno et al., 2020) y (Ribeiro et al., 2022) han destacado que la reducción de desviaciones adquiere mayor relevancia clínica en casos de anatomías complejas o con acceso restringido.

Estudios comparativos entre navegación estática y dinámica también respaldan estos resultados (Zubizarreta; Macho et al., 2020) encontraron que ambas modalidades ofrecen alta precisión, aunque la navegación dinámica puede adaptarse mejor a variaciones intraoperatorias. Sin embargo, en la microcirugía apical, la visibilidad y la ergonomía constituyen factores determinantes; por lo cual, las guías estáticas ofrecen mayor estabilidad y menor dependencia de la curva de aprendizaje (Geo et al., 2022; Kim et al., 2021).

Con la introducción de la tomografía computarizada de haz cónico (CBCT) y la navegación estática y dinámica, la tasa de éxito de la cirugía endodóntica ha aumentado, pasando de un rango del 44,2-53,5 % a cifras cercanas al 90,5 % (Geo, et al., 2022). Este

avance refleja el papel decisivo que desempeñan la planificación digital y la adecuada correlación imagen-modelo para el éxito de estas técnicas (Anderson et al., 2018) y (Coachman et al., 2020) resaltan que la integración de escaneos intraorales y CBCT mediante software de alta precisión es esencial para obtener ajustes quirúrgicos confiables. En este sentido, la revisión de (Sung et al., 2024) y el estudio de (Park et al., 2020) enfatizan que la elección del software y del protocolo de registro influye significativamente en la precisión final.

Pese a los beneficios señalados, la colocación inadecuada del tubo de perforación puede derivar en complicaciones como infecciones, daño a estructuras adyacentes o fracaso del tratamiento, lo que obliga a evaluar con rigor la exactitud de las guías (Connert *et al.* 2019).

Motivo por el cual, futuras investigaciones deberían explorar la integración de tecnologías híbridas, combinando la estabilidad de guías estáticas con la flexibilidad de navegación dinámica (Zubizarreta; Macho et al., 2021), así como evaluar su eficacia en ensayos clínicos con seguimiento a largo plazo. Asimismo, la incorporación de impresión 3D personalizada (Anderson et al., 2018) y flujos de trabajo digitales completos (Coachman et al., 2020) podría optimizar aún más la precisión y la experiencia del operador.

En el análisis de este estudio, se observaron diferencias estadísticamente significativas en la exactitud de la osteotomía y resección apical (prueba de Kruskal–Wallis, $p = 0,000$), así como una reducción notable en el tiempo operatorio medio, lo que respalda la hipótesis de que la optimización del diseño de la guía podría traducirse en mejoras tanto en precisión como en eficiencia. Los resultados mostraron tiempos quirúrgicos inferiores a los descritos en técnicas convencionales descritas por (Zhao et al., 2023) y (Chen; Jiang, 2023). Esto coincide con lo observado por (Cabezón et al., 2023), quienes demostraron que los diseños abiertos y

de bajo perfil en guías quirúrgicas facilitan la maniobrabilidad de los instrumentos, reduciendo el tiempo sin comprometer la visibilidad del campo operatorio.

En términos de exactitud, la desviación angular y lineal obtenida con la guía diseñada fue menor que la descrita en reportes previos sobre sistemas estáticos tradicionales (Peng et al., 2021) y comparable, en algunos parámetros, a los alcanzados con navegación dinámica (Liu et al., 2024; Huth et al., 2024). Este hallazgo es relevante si se considera que, históricamente, la navegación dinámica ha sido considerada superior en versatilidad y adaptación intraoperatoria, pero también más costosa, además de la necesidad de adquirir habilidades y conocimientos específicos para el uso de esta tecnología (Martinho et al., 2021).

Desde una perspectiva clínica, la reducción del área quirúrgica, además de preservar los tejidos circundantes, reduce el tiempo operatorio y aumenta la previsibilidad de resultados favorables del paciente (Giacomino et al., 2018; Peng et al., 2021). El uso de magnificación y técnicas guiadas puede mejorar la tasa de éxito de la cirugía endodóntica, como lo señalan (Setzer et al., 2012; 2022), especialmente en casos retratamientos o lesiones apicales persistentes. La mayor precisión observada en este estudio favorece directamente en la preservación de estructuras críticas como el hueso periapical, ápices adyacentes, seno maxilar y trayectos nerviosos; entre otros aspectos sustentados por (Peng et al., 2021) y en el metaanálisis reciente sobre endodoncia guiada (Iqbal et al., 2023). Potencialmente, la reducción de desviaciones podría disminuir el riesgo de perforaciones y optimizar la cicatrización postoperatoria, tal como se ha sugerido en estudios clínicos controlados (Zhao et al., 2023; Liu et al., 2024).

Para futuras investigaciones, sería pertinente evaluar este diseño en estudios clínicos prospectivos que comparen directamente su desempeño frente a navegación dinámica en

pacientes con condiciones anatómicas complejas, así como analizar la influencia de la experiencia operatoria, dado que evidencia reciente de (Chen et al., 2024) indica que la precisión en endodoncia guiada puede variar sustancialmente entre operadores novatos y experimentados, convirtiendo este factor en un determinante clave para la aplicabilidad clínica.

No obstante, deben considerarse las limitaciones de este estudio, debido a que se desarrolló en un entorno *in vitro*, sin contemplar variables propias del entorno clínico como sangrado, restricción por apertura bucal y movimientos involuntarios del paciente, la resistencia mecánica del hueso vital o la respuesta inflamatoria, elementos que pueden condicionar los resultados reales (Huth et al., 2024). Esto coincide con lo señalado por (Kuhl et al., 2015) y (Van Noort, 2012), quienes advierten que la transferencia de precisión desde modelos experimentales a la práctica clínica puede verse afectada por variables biomecánicas y operatorias.

Finalmente, debe recordarse que cualquier sistema guiado, está sujeto a riesgos de desviaciones acumuladas derivadas de errores en la adquisición de imágenes, conversión a archivos STL o el proceso de impresión 3D. Estas limitaciones ya señaladas por (Strbac et al. 2017) y (Martinho et al. 2021), refuerzan la necesidad de validación y estandarizar protocolos que aseguren la confiabilidad del procedimiento guiado en un entorno clínico real.

Conclusiones

Podemos concluir que la cirugía guiada garantiza tratamientos más precisos en comparación a la cirugía convencional gracias a un diseño optimizado de guía quirúrgica, teniendo en cuenta que, la exactitud del registro entre modelos dentales digitales y CBCT depende de los protocolos de escaneo y del *software* empleado.

Es así como, al comparar dos *software* de planificación para realizar cirugía apical guiada, Exoplan posee menor desviación y mayor precisión en el asentamiento de la guía quirúrgica, lo que podría implicar una mejor preservación de estructuras anatómicas críticas, además de presentar el menor tiempo de trepanación a diferencia de Blue Sky Plan y la cirugía convencional, que demostró mayor demora.

Estos datos permiten prever con mayor precisión la efectividad de los tratamientos cuando se trasladan al entorno clínico.

Referencias

- Anderson, J., Wealleans, J., & Ray, J. (2018). Endodontic applications of 3D printing. *International Endodontic Journal*, 51(9), 1005-1018. <https://doi.org/10.1111/iej.12917>
- Cabezón, C., Aubeux, D., Pérez, F., & Gaudin, A. (2023). 3D-printed metal surgical guides and open-frame guide concepts for endodontic microsurgery — Proof-of-concept studies and ex-vivo validations. *Applied Sciences*, 13(2),1031. <https://doi.org/10.3390/app1302-1031>
- Coachman, C., Georg, R., Bohner, L., Rigo, L. C., & Sesma, N. (2020). 3D digital design in the chairside workflow and trial restorations. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 124(5), 514–520. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2019.10.015>
- Connert, T., Zehnder, MS., Amato, M., Weiger, R., Kuhl, S., & Krastl, G. (2018). Microguided Endodontics: a method to achieve minimally invasive access cavity preparation and root canal location in mandibular incisors using a novel computer-guide technique. *International Endodontic Journal*. 51. 247-255. Doi:10.1111/iej.12809
- Connert, T., Krug, R., Eggman, F., Emsermann, I., ElAyouti, Weiger, Kuhl, S., & Krastl, G. (2019). Guided Endodontics versus Conventional Access Cavity Preparation: A Comparative Study on Substance Loss Using 3-dimensional–printed Teeth. *Journal of Endodontics*, 45(3), 327–331. doi: 10.1016/j.joen.2018.11.00
- Chen, C., Qin, L., Zhang, R., & Meng, L. (2024) Comparison of Accuracy and Operation Time in Robotic, Dynamic, and Static-Assisted Endodontic Microsurgery: An In Vitro Study. *Journal of Endodontics*. 50(10): 1448-1454. <https://doi.10.1016/j.joen.2024.05.018>
- Geo, T.D., Saxena, P., & Saurabh, P. (2022). Static vs. dynamic navigation for endodontic microsurgery: A comparative review. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, 12(4), 410–412. <https://doi.org/10.1016/j.jobcr.2022>
- Giacomino, C. M., Ray, J. J., & Wealleans, J. A. (2018). Targeted endodontic microsurgery: A novel approach using 3D-printed guides and trephine burs for anatomically challenging cases — Report of three cases. *Journal of Endodontics*, 44(4), 671–677. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2018.01.018>

- Ha, S.-W., Choi, S. M., Kim, S., Song, M., Hu, K.-S., & Kim, E. (2025). Accuracy of 3-dimensional surgical guide for endodontic microsurgery with a new design concept: A cadaver study. *International Endodontic Journal*, 58(3), 295–304. <https://doi.org/10.1111/iej.14161>
- Huth, K. C., Borkowski, L., Liebermann, A., Berlinghoff, F., Hickel, R., Schwendicke, F., & Reymus, M. (2024). Comparing accuracy in guided endodontics: dynamic real-time navigation, static guides, and manual approaches for access cavity preparation — An in vitro study using 3D-printed teeth. *Clinical Oral Investigations*.28(4):212. <https://doi.org/10.1007/s00784-024-05434-8>
- Iqbal, A., Sharari, T., Khattak, O., et al. (2023). Review article: Guided Endodontics: A Narrative Review. *Journal Medicina*. 59. 678. <https://doi.org/10.3390/medicina59040678>
- Jain, S. D., Saunders, M. W., Carrico, C. K., Jadhav, A., Deeb, J. G., & Myers, G. L. (2020). Dynamically navigated versus freehand access cavity preparation: A comparative study on substance loss using simulated calcified canals. *Journal of Endodontics*, 46(11), 1745–1751. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2020.07.025>
- Kim, H. S., Park, J. W., & Lee, S. J. (2021). Dynamic navigation system for precise endodontic access cavity preparation: An in vitro study. *Journal of Endodontics*, 47(9), 1435- 1442. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2021.05.010>
- Kim GB, Lee S, Kim H et al. (2016) Three-Dimensional Printing: Basic Principles and Applications in Medicine and Radiology. *Korean Journal of Radiology*. 17(2): 182–97. <https://doi.org/10.3348/kjr.2016.17.2.182>
- Kuhl, S., Payer, M., Zitzmann, N. U., Lambrecht, J. T., & Filippi, A. (2015). Technical accuracy of printed surgical templates for guided implant surgery with coDiagnostiX software. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 17(Suppl 1), 177– 182. <https://doi.org/10.1111/cid.12145>
- Krast, G., Weiger, R., Ebeleseder, K., Galler, K. (2022). Present status and future directions: Endodontic management of traumatic injuries to permanente teeth. *International Endodontic Journal*.55 (Suppl. 4): 1003-1019. Doi: 10.1111/iej.13672

- Liu, S.-M., Peng, L., Zhao, Y.-J., Han, B., Wang, X.-Y., & Wang, Z.-H. (2024). Accuracy and efficiency of dynamic navigated root-end resection in endodontic surgery: A pilot in vitro study. *BMC Oral Health*, 24(582). <https://doi.org/10.1186/s12903-024-04306-6>
- Martinho, FC., Dianat, O., Nosrat, A., Mostoufi, B., Price, JB., & Gupta, S. (2021). Accuracy and efficiency of guided root-end resection using a dynamic navigation system: A human cadaver study. *International Endodontic Journal*, 54(5):793- 801. <https://doi:10.1111/iej.13466>.
- Moreno, C., Torres, A., Lambrechts, P., & Jacobs, R. (2020). Clinical applications, accuracy, and limitations of guided endodontics: A systematic review. *International Endodontic Journal*, 53(2), 214–231. <https://doi.org/10.1111/iej.13216>
- Park, J. H., Hwang, C. J., Choi, Y. J., Houschyar, K. S., Yu, J. H., Bae, S. Y., & Cha, J. Y. (2020). Registration of digital dental models and cone-beam computed tomography images using 3-dimensional planning software: Comparison of accuracy according to scanning methods and software. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 157(6), 843–851. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2019.07.016>
- Peng, L., Zhao, J., Wang, Z. H., Sun, Y. C., & Liang, Y. H. (2021). Accuracy of root- end resection using a digital guide in endodontic surgery: An in vitro study. *Journal of Dental Sciences*, 16(1), 45–50. <https://doi.org/10.1016/j.jds.2020.06.024>
- Ribeiro, D., Reis, E., Marques, J., Falacho, R., & Palma, P. (2022). Guided Endodontics: Static vs. Dynamic Computer-Aided Techniques—A Literature Review. *Journal of Personalized Medicine*, 12, 1516. <https://doi.org/10.3390/jpm12091516>
- Setzer, F. C., Kohli, M. R., Shah, S. B., Karabucak, B., & Kim, S. (2012). Outcome of endodontic surgery: A meta-analysis of the literature — Part 2: Comparison of endodontic microsurgical techniques with and without the use of higher magnification. *Journal of Endodontics*, 38(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2011.09.031>
- Setzer, F. C., & Kratchman, S. I. (2022). Present status and future directions: Surgical endodontics. *International Endodontic Journal*, 55(Suppl 4), 1020–1058. <https://doi.org/10.1111/iej.13783>

- Strbac, G. D., Schnappauf, A., Giannis, K., Moritz, A., & Ulm, C. (2017). Guided modern endodontic surgery: A novel approach for guided osteotomy and root resection. *Journal of Endodontics*, 43(4), 496–501. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2016.12.028>
- Sung-Hoon Lim. (2024). Transformative Advances in Digital Orthodontics, *Orthodontics & Craniofacial Research*, 27 (2):4-5. 10.1111/ocr.12871, 27, S2, (4-5), (2024).
- Van Noort, R. (2012). The future of dental devices is digital. *Dental Materials*, 28(1), 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2011.10.014>
- Peng, L., Zhao, J., Wang, Z. H., Sun, Y. C., & Liang, Y. H. (2021). Accuracy of root- end resection using a digital guide in endodontic surgery: An in vitro study. *Journal of Dental Sciences*, 16(1), 45–50. <https://doi.org/10.1016/j.jds.2020.06.024>
- Zehnder, M. S., Connert, T., Weiger, R., Krastl, G., & Kuhl, S. (2016). Guided endodontics: Accuracy of a novel method for guided access cavity preparation and root canal location. *International Endodontic Journal*, 49(10), 966–972. <https://doi.org/10.1111/iej.12544>
- Zhao, D., Xie, W., Li, T., Wang, A., Wu, L., Kang, W., Wang, L., Guo, S., Tang, X., & Xie, S. (2023). New-designed 3D printed surgical guide promotes the accuracy of endodontic microsurgery: A study of 14 upper anterior teeth. *Scientific Reports*, 13: 15512. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42767-X>
- Zubizarreta-Macho, Á., Muñoz, A. P., Deglow, E. R., Agustín-Panadero, R., & Álvarez, J. M. (2020). Accuracy of computer-aided dynamic navigation compared to computer-aided static procedure for endodontic access cavities: An in vitro study. *Journal of Clinical Medicine*, 9(1), 129. <https://doi.org/10.3390/jcm9010129>
- Zubizarreta-Macho, Á., Valle Castaño, S., Montiel-Company, J. M., & Mena-Álvarez, J. (2021). Effect of computer-aided navigation techniques on the accuracy of endodontic access cavities: A systematic review and meta-analysis. *Biology*, 10(3), 212. <https://doi.org/10.3390/biology1003021>