



TENDENCIAS FUTURAS EN IMPLANTOLOGÍA DIGITAL



OD. LOURDES ELIZABETH MENÉNDEZ OÑA. ESP.
OD. MARCIA VICTORIA MONTESDEOCA VELÁSQUEZ. ESP.
OD. EDISON ANDRÉS FLORES MEJÍA.
OD. WASHINGTON JAVIER SÁNCHEZ HARO ESP.

Editado y distribuido por

CASA EDITORA DEL POLO

Manta, Manabí, Ecuador 2025

Correo electrónico: revistapolodelco@gmail.com

Hecho el Depósito de Ley.

Depósito Legal:

ISBN: 978-9942-684-58-5

Serie: Odontología

Título: TENDENCIAS FUTURAS EN IMPLANTOLOGÍA DIGITAL

Autores:

Od. Lourdes Elizabeth Menéndez Oña. Esp.

uq.lourdesmo79@uniandes.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000000161578365>

Od. Marcia Victoria Montesdeoca Velásquez. Esp.

uq.marciamv65@uniandes.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1656-1202>

Od. Edison Andrés Flores Mejía.

uq.edisonfm26@uniandes.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4588-425>

Od. Washington Javier Sánchez Haro. Esp.

uq.washintonsh74@uniandes.edu.ec

ORCID: <http://orcid.org/0009-0003-3406-5507>

Todas las obras publicadas por la Casa Editora del Polo se someten previamente a un riguroso proceso de evaluación académica llevado a cabo por pares expertos debidamente acreditados. Esta obra está destinada exclusivamente al uso personal y colectivo en actividades de carácter académico, investigativo, formativo y de divulgación científica.

Esta obra está bajo una licencia internacional

Revisión, Ortografía y Redacción

Lcda. Thalía Cifuentes Rojas MSc.

Diseño de portada

Lcda. Rosa Contreras Jordán MSc.

Diagramación:

Ing. Gabriela Almache Granda MSc.

CONSTANCIA DE ARBITRAJE ACADÉMICO PARA PUBLICACIÓN EN FORMATO DIGITAL

La Casa Editora del Polo certifica que el manuscrito presentado para su publicación en formato digital ha sido sometido a un proceso de arbitraje académico exhaustivo, conforme a los estándares internacionales de evaluación por pares.

El proceso fue desarrollado por evaluadores externos con formación doctoral, seleccionados por su solvencia académica, producción científica y experticia disciplinar. La evaluación se llevó a cabo bajo la modalidad de arbitraje doble ciego, asegurando la independencia, transparencia e imparcialidad de los dictámenes.

Los especialistas designados analizaron de manera sistemática los siguientes criterios:

- Solidez metodológica y coherencia epistemológica,
- Pertinencia, vigencia y profundidad del marco teórico,
- Originalidad, aporte científico y relevancia para el campo de estudio,
- Consistencia argumentativa, claridad expositiva y estructura lógica del texto,
- Cumplimiento de estándares editoriales, éticos y de calidad académica,
- Adecuación del contenido a los requisitos técnicos para su difusión digital.

Tras concluir el proceso de evaluación, el manuscrito obtuvo un dictamen favorable, condicionado a la incorporación de las recomendaciones formuladas por los árbitros, las cuales fueron atendidas satisfactoriamente por los autores.

Comité Editorial

RESOLUCIÓN DEL RECTORADO DE LA UNIVERSIDAD REGIONAL AUTÓNOMA DE LOS ANDES (UNIANDES)

Considerando

Que, la Od. Lourdes Elizabeth Menéndez Oña, Esp.; la Od. Marcia Victoria Montesdeoca Velásquez, Esp.; el Od. Edison Andrés Flores Mejía, Esp.; y el Od. Washington Javier Sánchez Haro, Esp., han desempeñado importantes funciones como profesores en la Universidad Regional Autónoma de Los Andes (UNIANDES).

Que, en el desempeño de sus funciones han demostrado capacidad profesional, eficiencia, y lealtad institucional, constituyéndose en docentes e investigadores que han propiciado el desarrollo y fortalecimiento de la UNIANDES.

Que, en el período de sus ejercicios docentes han demostrado un alto nivel de conocimientos, excelentes métodos pedagógicos y el nexos hacia sus estudiantes, por lo que han sido y son estimados y respetados en el campo académico de nuestra universidad.

Que, la Ley Orgánica de Educación Superior (LOES) prevé que las Instituciones de Educación Superior deben incentivar a sus docentes y docentes investigadores en la generación de obras de carácter científico relevante para el desempeño de sus actividades, y por ende este Rectorado apoya a los distintos docentes y profesionales administrativos para que desarrollen y publiquen obras en el contexto de su gestión.

Que, la UNIANDES ha presentado los informes técnicos favorables (avales de pares) para que se impulse el desarrollo investigativo, la elaboración del contenido y la publicación de la obra **“Tendencias Futuras en Implantología Digital”**, la cual puede convertirse en un aporte para la comunidad científica universitaria.

Por tanto, el Rectorado de conformidad al art. 48 de la Ley Orgánica de Educación Superior y en concordancia con el art. 34 del Estatuto de la Universidad Regional Autónoma de Los Andes (UNIANDES):

RESUELVE:

- 1) Auspiciar y conceder el aval académico de la Universidad Regional Autónoma de Los Andes (UNIANDES) en favor de la investigación, desarrollo y publicación de la obra **“Tendencias Futuras en Implantología Digital”**, cuya autoría le corresponde a: la Od. Lourdes Elizabeth Menéndez Oña, Esp.; la Od. Marcia Victoria Montesdeoca Velásquez, Esp.; el Od. Edison Andrés Flores Mejía, Esp.; y el Od. Washington Javier Sánchez Haro, Esp.
- 2) Comuníquese a las diferentes unidades académicas y administrativas para los fines legales pertinentes.

Dado en la ciudad de Ambato, provincia de Tungurahua, República del Ecuador, a los veinte días del mes de diciembre del dos mil veinticinco.



Ing. Gustavo Alvarez Gómez, PhD
RECTOR



UNIVERSIDAD REGIONAL AUTÓNOMA DE LOS ANDES UNIANDES

DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN

INFORME DEL EVALUADOR DE LIBROS

Nombre y apellidos del evaluador: Od. Cristian Antonio Bajaan Rugel. Esp.

Grado académico: Doctor

Institución donde labora: Universidad Estatal de Guayaquil

Cargo o función que desempeña: Docente

Título del libro: Tendencias Futuras en Implantología Digital

Criterio	Mal	Regular	Bien	Excelente
1. El tema tratado es de actualidad e importancia para la ciencia específica.				X
2. La extensión del libro es adecuada				X
3. El análisis teórico es actualizado (más del 50% de las referencias son de los últimos cinco años)				X
4. El libro denota un aporte a la disciplina que aborda				X
5. Está bien fundamentada la teoría incluida en el libro				X
6. Se evidencia objetividad en los temas tratados				X
7. Aborda las corrientes principales de la ciencia específica				X
8. Los datos abordados en el libro se encuentran validados por métodos que lo fundamentan.				X
9. La redacción y ortografía son buenas.				X
10. Existe relación entre el título y los aspectos abordados en el libro.				X
11. Los cuadros, tablas y figuras tienen buena calidad.				X

Aspectos a comentar.

Comente en una o varias hojas los siguientes elementos relacionados con el libro.

- Actualidad e importancia del libro.
- Aporte al estudio de la ciencia específica que trata.
- Objetividad de la información presentada
- Actualidad de las citas y referencias bibliográficas.
- Validez de los datos incluidos en el libro.

Finalmente marque con una X su criterio general sobre la obra analizada

Publicar de manera directa	X
Publicar con adecuaciones menores (hasta 30 días para solucionar)	
Publicar con adecuaciones mayores (hasta 90 días para solucionar)	
No publicar	

Firma:  Firmado electrónicamente por:
CRISTIAN ANTONIO
BAJANA RUGEL
Validar únicamente con FirmaRo

Dr. Cristian Antonio Bajaan Rugel. Esp.

Fecha: 22 de marzo de 2026.



UNIVERSIDAD REGIONAL AUTÓNOMA DE LOS ANDES UNIANDES
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN
INFORME DEL EVALUADOR DE LIBROS

Nombre y apellidos del evaluador: Lcda. Rosa María Chicaíza Chicaíza

Grado académico: Master

Institución donde labora: Universidad Técnica Estatal de Quevedo

Cargo o función que desempeña: Docente – Coordinadora de Investigación

Título del libro: Tendencias Futuras en Implantología Digital

Criterio	Mal	Regular	Bien	Excelente
12. El tema tratado es de actualidad e importancia para la ciencia específica.				X
13. La extensión del libro es adecuada				X
14. El análisis teórico es actualizado (más del 50% de las referencias son de los últimos cinco años)				X
15. El libro denota un aporte a la disciplina que aborda				X
16. Está bien fundamentada la teoría incluida en el libro				X
17. Se evidencia objetividad en los temas tratados				X
18. Aborda las corrientes principales de la ciencia específica				X
19. Los datos abordados en el libro se encuentran validados por métodos que lo fundamentan.				X
20. La redacción y ortografía son buenas.				X
21. Existe relación entre el título y los aspectos abordados en el libro.				X
22. Los cuadros, tablas y figuras tienen buena calidad.				X

Aspectos a comentar.

Comente en una o varias hojas los siguientes elementos relacionados con el libro.

- f) Actualidad e importancia del libro.
- g) Aporte al estudio de la ciencia específica que trata.
- h) Objetividad de la información presentada
- i) Actualidad de las citas y referencias bibliográficas.
- j) Validez de los datos incluidos en el libro.

Finalmente marque con una X su criterio general sobre la obra analizada

Publicar de manera directa	X
Publicar con adecuaciones menores (hasta 30 días para solucionar)	
Publicar con adecuaciones mayores (hasta 90 días para solucionar)	
No publicar	



Firmado electrónicamente por:
ROSA MARIA
CHICAIZA CHICAIZA
Validar Únicamente con FirmaEC

Firma: _____

Lcda. Rosa María Chizaíza Chicaíza. MSc.

Fecha: 20 de marzo de 2026.

CONTENIDO

0.1 Prólogo

0.2 Introducción

03. Capítulo 1

FUNDAMENTOS DE LA IMPLANTOLOGÍA ORAL

- 1.1. Introducción general a la implantología oral
- 1.2. Historia y evolución de la implantología oral
- 1.3. Principios biológicos de la implantología oral
- 1.4. Principios mecánicos y diseño implantario
- 1.5. Factores del paciente y del entorno clínico
- 1.6. Tecnología digital y tendencias futuras en implantología oral

04. Capítulo 2

SISTEMAS CAD / CAM Y DISEÑO ASISTIDO EN IMPLANTOLOGÍA DIGITAL

- 2.1. Conceptos básicos de CAD / CAM en odontología e implantología
- 2.2. Componentes del sistema CAD / CAM
- 2.3. Proceso completo: del escaneo al diseño y producción de prótesis
- 2.4. Materiales para prótesis implantosoportadas en flujos CAD / CAM
- 2.5. Ventajas, limitaciones y errores frecuentes en CAD / implantológico

05. Capítulo 3

SOFTWARE Y FLUJO DE TRABAJO DIGITAL EN IMPLANTOLOGÍA

- 3.1. Introducción a la planificación quirúrgica en implantología
- 3.2. Conceptos y fundamentos de la cirugía guiada
- 3.3. Precisión, seguridad y errores en cirugía guiada
- 3.4. Integración de imágenes: CBCT, escáner y modelos digitales
- 3.5. Diseño y fabricación de guías quirúrgicas
- 3.6. Protocolos clínicos y pasos operatorios en cirugía guiada
- 3.7. Casos clínicos ilustrativos en diferentes escenarios anatómicos
- 3.8. Complicaciones y manejo de fallos en cirugía guiada
- 3.9. Aspectos éticos, formación y líneas futuras de investigación

06. Capítulo 4

ECOSISTEMA DE SOFTWARE Y FLUJOS DE TRABAJO DIGITALES

- 4.1. Introducción al ecosistema de software en implantología digital.
- 4.2. Integración de datos: CBCT, modelos STL y registros oclusales.
- 4.3. Concepto de flujo de trabajo digital y coherencia geométrica.
- 4.4. Software de planificación implantológica: fundamentos teóricos

07. Capítulo 5

CASOS CLÍNICOS Y APLICACIONES AVANZADAS EN IMPLANTOLOGÍA DIGITAL

- 5.1 Caso clínico 1: Restauración unitaria anterior con flujo digital.
- 5.2 Caso clínico 2: Rehabilitación parcial posterior asistida.
- 5.3 Caso clínico 3: rehabilitación de arcada completa sobre implantes.

08. Referencias





PRÓLOGO

La implantología oral ha experimentado, en las últimas décadas, una transformación profunda impulsada por el desarrollo de nuevas tecnologías diagnósticas, de planificación y de fabricación de prótesis. Lo que en sus inicios fue un campo centrado casi exclusivamente en la osteointegración y en los principios biomecánicos básicos, hoy se ha convertido en un escenario donde convergen la tomografía volumétrica, los escáneres intraorales, los sistemas CAD/CAM, la impresión 3D y, más recientemente, la inteligencia artificial y la robótica. La presente obra surge con el objetivo primordial de brindar a alumnado de pregrado, posgrado y odontólogos en ejercicio una perspectiva tanto integral como actualizada y didáctica acerca de la implantología moderna, pues se concede una relevancia capital a los flujos de trabajo digitales, así como a su repercusión directa en la rutina clínica habitual.

En primer lugar, el Capítulo 1, denominado “Fundamentos de la Implantología Oral”, repasa la trayectoria histórica y la evolución disciplinar desde los albores empíricos hasta la consolidación definitiva de la osteointegración y el advenimiento de los implantes actuales. A partir de ese momento, se examinan los principios biológicos, mecánicos y de diseño implantario, igualmente que los factores sistémicos y locales del paciente que determinan el pronóstico terapéutico. Dado que este marco teórico sienta las bases indispensables, resulta evidente que la tecnología digital no suplanta a la biología, sino que, por el contrario, la potencia y exige, en consecuencia, respetarla con un rigor superior.

Seguidamente, el Capítulo 2, “Sistemas CAD/CAM y Diseño Asistido en Implantología Digital”, introduce al lector en los conceptos nucleares del diseño y la fabricación computarizada. De manera específica, se detallan los componentes de un sistema CAD/CAM, los biomateriales disponibles, los distintos modelos operativos —tanto de sillón como de laboratorio— y el flujo íntegro que media entre la adquisición de datos mediante escaneo y la manufactura de prótesis definitivas y provisionales. El acento recae, sobre todo, en cómo estas tecnologías viabilizan la personalización de pilares, prótesis y estructuras, mejorando, de este modo, el ajuste, la estética y la trazabilidad de los tratamientos.

En lo que atañe al Capítulo 3, “Cirugía Guiada y Planificación Preoperatoria”, se analizan los fundamentos de la cirugía guiada estática y dinámica, así como su integración con la tomografía de haz cónico (CBCT) y los escáneres intraorales, sin olvidar los protocolos clínicos que permiten trasponer al campo operatorio la planificación gestada en el entorno virtual.

Por su parte, el Capítulo 4, “Software y Flujo de Trabajo Digital en Implantología”, ahonda en los programas líderes de planificación implantológica y en la unificación de datos clínicos, radiográficos y protésicos en un único ecosistema digital. En este sentido, se revisan los flujos de trabajo desde el diagnóstico hasta la rehabilitación final, incluyendo la simulación de tratamientos, la planificación de carga inmediata y la coordinación tanto del equipo clínico como del laboratorio. Gracias a ello, el lector hallará herramientas conceptuales y prácticas para organizar con eficiencia su propio flujo digital.

Finalmente, el Capítulo 5, “Casos Clínicos, Innovaciones y Perspectivas Futuras”, expone supuestos de éxito que ilustran la aplicación de los principios desarrollados con anterioridad, contrastando enfoques analógicos y digitales y poniendo de relieve, en definitiva, las ventajas de estos últimos cuando se integran debidamente en la praxis clínica diaria. Además, se abordan las tendencias emergentes, como la inteligencia artificial aplicada al diagnóstico y a la planificación, la impresión 3D avanzada, los nuevos materiales y el papel creciente de la robótica en la implantología. Este capítulo ofrece, al mismo tiempo, una reflexión crítica sobre los retos éticos, formativos y organizativos que acompañan a estas innovaciones.

Este texto es el trabajo conjunto de un equipo de autores con experiencia clínica, docente e investigadora en el campo de la implantología y la odontología restauradora. Su esfuerzo se orienta a aportar un material de consulta útil para la comunidad académica y profesional, en particular para quienes, desde universidades como UNIANDES y otras instituciones de educación superior, asumen el reto de formar odontólogos capaces de desenvolverse con solvencia en un entorno tecnológico cada vez más exigente y cambiante.



INTRODUCCIÓN

La implantología oral contemporánea se encuentra en una etapa de madurez clínica caracterizada por la alta predictibilidad terapéutica y, al mismo tiempo, por un cambio metodológico profundo: la incorporación progresiva de flujos digitales que transforman el diagnóstico, la planificación, la ejecución quirúrgica y la rehabilitación protésica. Por consiguiente, ante tal coyuntura, el desafío trasciende ya la mera “colocación de los implantes”, para convertirse en la imperativa necesidad de fusionar de modo riguroso los principios biológicos, los criterios biomecánicos, los objetivos protésicos y las herramientas tecnológicas que nos faculen para adoptar decisiones más seguras, reproducibles y auditables. En virtud de lo expuesto, la presente obra se concibe a guisa de una guía académica y clínica que estructura, conservando en todo momento un enfoque formativo, los conceptos y procedimientos esenciales a fin de aprehender la implantología desde sus cimientos hasta su praxis digital avanzada.

Dado que el presente escrito parte del reconocimiento de que la implantología moderna logra sustentarse en la osteointegración y en una comprensión precisa de la respuesta de los tejidos duros y blandos ante los biomateriales, así como en la lógica biomecánica particular de las restauraciones implantosoportadas, desde el inicio se subraya —con total énfasis— que el éxito a largo plazo no depende exclusivamente del implante en tanto que dispositivo aislado, sino de la convergencia global de variables clínicas y protésicas —estado sistémico del paciente, factores de riesgo, diseño restaurador y mantenimiento— las cuales han de ser evaluadas con rigor criterioso y respaldo probatorio.

La propuesta del libro no se basa en ser totalmente tecnocrata, sino que presenta la tecnología como un medio para mejorar la planificación y la precisión, sin sustituir el juicio clínico ni la evaluación integral del caso. Manteniendo esa visión, el libro se ha estructurado en cinco capítulos en los cuales se abarca desde lo conceptual hasta lo aplicado. En el Capítulo 1 se establece la base científica indispensable: historia, principios biológicos, fundamentos mecánicos y criterios clínicos que justifican la implantología como alternativa terapéutica consolidada. De este modo, en el Capítulo 2 se presentan los sistemas CAD/CAM y el diseño asistido, explicándose su función en la manufactura de componentes, estructuras y rehabilitaciones, mostrándose, a su vez, de qué manera el diseño digital converge con los materiales contemporáneos y con criterios de validación y calidad. A continuación, el Capítulo 3 profundiza en los conceptos y métodos de la planificación preoperatoria y la cirugía guiada, resaltando el giro copernicano hacia la planificación tridimensional y protésicamente guiada, lugar en el que el implante se posiciona en atención a la rehabilitación objetivo y no tan solo en virtud del hueso disponible. Continuamente, en el Capítulo 4 se consolida el enfoque sistémico de la obra y expone el ecosistema de software y flujo de trabajo digital a manera de una secuencia continua en la cual se toman datos clínicos y se convierten en decisiones terapéuticas y soluciones protésicas; allí se tratan fases, tipologías de programas, roles del equipo, indicadores de calidad, ciberseguridad y gestión de la información, con el propósito de que la implantología digital se comprenda como un proceso clínico-tecnológico susceptible de estandarización y mejora continua. Ya en el Capítulo 5, los postulados se aterrizan en escenarios clínicos tipo, contrastándose abordajes convencionales y digitalmente asistidos, y se inicia un debate sobre las innovaciones emergentes —entre las que figuran la inteligencia artificial, la impresión 3D avanzada y la robótica— bien como sobre los retos éticos, formativos y organizativos que conllevan la transformación digital de la especialidad. En definitiva, esta obra persigue aportar un material de consulta provechoso tanto para alumnos y profesionales en formación como para clínicos que anhelan actualizarse.

1.1. Introducción general a la implantología oral

La implantología oral se ha consolidado como una de las principales alternativas terapéuticas para la rehabilitación de pacientes parcial o totalmente edéntulos, ofreciendo soluciones estables, funcionales y estéticamente satisfactorias allí donde las prótesis convencionales presentan limitaciones. Aunque desde la antigüedad se han documentado múltiples intentos de sustitución de dientes mediante materiales naturales o artificiales, la implantología¹ moderna se fundamenta en el concepto de osteointegración, es decir, la unión íntima y funcional entre el hueso vivo y la superficie de un implante de titanio o de otro material biocompatible². (1–3)

A diferencia de los dientes naturales, los implantes dentales carecen de ligamento periodontal y se fijan directamente al hueso. Esta característica puede conferir ventajas y desafíos específicos: por un lado, puede otorgar una gran estabilidad frente a las fuerzas masticatorias; y por otro lado, una menor amortiguación y una biomecánica³ distinta, lo cual exige una planificación cuidadosa del número, la posición y el tipo de rehabilitación protésica. (4–7)

En las últimas décadas, múltiples estudios clínicos de seguimiento a largo plazo han demostrado tasas de supervivencia de los implantes superiores al 90–95 % a 10–15 años, siempre que se respeten los principios biológicos, mecánicos y protésicos, y se controle la presencia de factores de riesgo como periodontitis previa, tabaquismo o mala higiene oral. (4–8) Esta elevada predictibilidad ha llevado a considerar los implantes como un estándar de tratamiento en la rehabilitación moderna.

Sin embargo, el éxito no depende exclusivamente del dispositivo implantario⁴; también intervienen:

- La calidad y el volumen de hueso disponible.
- El estado sistémico del paciente y sus hábitos.
- El diseño protésico y la distribución de fuerzas.
- El programa de mantenimiento y control a largo plazo.
- Y, de forma creciente, el uso razonado de tecnologías digitales como la tomografía computarizada de haz cónico (CBCT), los escáneres intraorales⁵, los sistemas CAD/CAM, la cirugía guiada y las herramientas basadas en inteligencia artificial. (9–15)

¹ Rama de la odontología encargada de la colocación de implantes dentales para reemplazar dientes perdidos.

² Propiedad de un material que puede interactuar con el cuerpo humano sin causar rechazo ni efectos adversos.

³ Ciencia que estudia las fuerzas y movimientos del cuerpo humano y cómo estos afectan a tejidos y estructuras biológicas.

⁴ Relativo a los implantes dentales o a los procedimientos, componentes y tratamientos asociados a ellos.

⁵ Dispositivos digitales que capturan imágenes tridimensionales de la cavidad oral para diagnóstico y planificación de tratamientos odontológicos.

El objetivo de este capítulo es ofrecer una visión amplia y articulada de los fundamentos de la implantología oral, abordando:

- Su historia y evolución, desde los primeros intentos empíricos hasta la implantología digital contemporánea.
- Los principios biológicos que explican la osteointegración⁶ y la respuesta de los tejidos duros y blandos.
- Los principios mecánicos y de diseño que sustentan la estabilidad funcional de las restauraciones.
- Los factores del paciente y del entorno clínico que condicionan el pronóstico.
- Y la importancia de la tecnología en la práctica clínica actual y en las tendencias futuras.

Esta base teórica será imprescindible para comprender, en los capítulos posteriores, el papel de los sistemas CAD/CAM⁷, la cirugía guiada y los flujos de trabajo digitales en implantología. (9,14,15)

1.2. Historia y evolución de la implantología oral

1.2.1. Antecedentes remotos y proto implantes⁸

Los orígenes de la sustitución dentaria se remontan a civilizaciones antiguas, donde se han encontrado piezas elaboradas en madera, hueso, marfil, concha o metales blandos, insertadas en los maxilares de individuos vivos o fallecidos. (1,2) En la cultura maya, por ejemplo, se han descrito estructuras incrustadas en el hueso alveolar que podrían considerarse “proto implantes”, aunque su verdadera función (estética, ritual o funcional) sigue siendo objeto de debate. (1,2)

Figura 1. *Proto implantes dentales en civilizaciones antiguas*



Nota: Ejemplos de intentos tempranos de sustitución dentaria mediante materiales naturales en culturas precolombinas, que evidencian la búsqueda histórica de restauración funcional y estética, aunque sin fundamentos biológicos ni biomecánicos modernos.

⁶ Proceso biológico mediante el cual el implante se une de forma directa y estable al hueso, sin tejido intermedio.

⁷ Tecnología digital (Diseño y Manufactura Asistidos por Computadora) utilizada para diseñar y fabricar prótesis y componentes dentales.

⁸ Dispositivos o modelos preliminares utilizados para pruebas, planificación o evaluación antes de la fabricación o colocación definitiva de un implante.

Estos hallazgos evidencian que el ser humano ha buscado desde tiempos remotos restaurar la función masticatoria y la apariencia dental. Sin embargo, la ausencia de principios de biocompatibilidad, asepsia y estabilidad biomecánica hacía que estas soluciones fueran esencialmente empíricas y de duración incierta.

1.2.2. Primeras experiencias de implantología metálica

Figura 2. Prótesis dental metálica histórica (siglo XVII)



Nota: Dispositivo protésico metálico utilizado antes del desarrollo de la implantología moderna, caracterizado por retención mecánica y ausencia de osteointegración. Fuente adaptada de registros históricos europeos.

Históricamente, con el impulso de la cirugía y la metalurgia entre finales del siglo XIX y principios del XX, se comenzaron a diseñar los dispositivos metálicos destinados a sustituir piezas dentales. Se emplearon materiales como oro, platino, acero inoxidable y aleaciones de cromo-cobalto, además de diversos diseños (clavos, láminas, cilindros, tornillos). (1,2). En esta etapa, la retención de las prótesis dentales era casi en su totalidad mecánica; no existía aún el concepto de integración biológica íntima entre el hueso y el material implantado.

Muchos de estos implantes fracasaban precozmente por infección, movilidad o rechazo, debido a la falta de asepsia⁹, la limitada comprensión de la biología ósea y la baja biocompatibilidad de los materiales utilizados. (1–3) A pesar de su tasa de fracaso, estas primeras experiencias sentaron las bases para el desarrollo posterior: introdujeron la idea de un anclaje intraóseo y estimularon la búsqueda de materiales más biocompatibles y diseños más estables.

⁹ Conjunto de medidas y procedimientos destinados a prevenir la contaminación por microorganismos y mantener un entorno libre de infecciones, especialmente en procedimientos clínicos y quirúrgicos.

1.2.3. Implantes subperiósticos¹⁰, intramucosos¹¹ y láminas implantarias¹²

Antes de la consolidación de los implantes endoóseos roscados, tres grandes líneas de desarrollo marcaron la implantología:

Figura 3. Implantes subperiósticos: diseño y ubicación



Nota: Estructuras metálicas colocadas sobre el hueso alveolar y por debajo del periostio, utilizadas principalmente en maxilares atróficos antes de la consolidación de los implantes endoóseos.

1. Implantes subperiósticos

- Estos eran estructuras metálicas personalizadas que se colocaban sobre el hueso, por debajo del periostio, con postes emergentes hacia la cavidad oral para soportar prótesis completas.
- Requerían una cirugía extensa e impresiones óseas directas para así obtener la forma del maxilar, pero aumentaba el riesgo de morbilidad y el error dimensional.
- Presentaban una elevada tasa de complicaciones tales como: exposición de la estructura, infecciones, aflojamiento etc., lo que limitó su uso a pesar de ciertos éxitos iniciales en maxilares muy atróficos. (3,4)

Figura 4. Implantes intramucosos como sistemas de retención protésica



Nota: Dispositivos diseñados para mejorar la estabilidad de prótesis removibles mediante anclaje en la mucosa, con resultados limitados en cuanto a longevidad clínica.

¹⁰ Implantes colocados sobre el hueso maxilar, debajo del periostio, utilizados cuando no hay suficiente altura ósea para implantes convencionales.

¹¹ Dispositivos de retención que se colocan en la mucosa oral para mejorar la estabilidad de prótesis removibles.

¹² Implantes en forma de lámina que se insertan dentro del hueso maxilar, indicados en zonas con rebordes óseos estrechos.

2. Implantes intramucosos¹³

- Pequeños elementos metálicos fijados en la mucosa, generalmente palatina, que actuaban como retenedores adicionales para prótesis completas o parciales.
- Mejoraban la retención, pero no resolvían el problema de la estabilidad ósea y su duración era limitada. (1,2).

3. Implantes laminares e interradiculares

Figura 5.

Implantes laminares e interradiculares



Nota: Diseños implantarios históricos en forma de lámina o colocados entre raíces dentarias, cuya predictibilidad biomecánica y biológica resultó insuficiente a largo plazo.

- Diseños en forma de lámina que se insertaban en ranuras practicadas en el hueso alveolar.
- Implantes interradiculares colocados en raíces o fragmentos radiculares remanentes.
- También mostraron resultados poco predecibles a largo plazo debido a problemas biomecánicos y biológicos.

Con la perspectiva actual, puede decirse que estos diseños fueron intentos ingeniosos pero limitados por la tecnología de la época y por el desconocimiento de la fisiología ósea y los requisitos de integración estable.

¹³ Dispositivos de retención colocados en la mucosa oral que mejoran la estabilidad de prótesis removibles, sin integrarse al hueso.

1.2.4. La revolución de la osteointegración¹⁴

Figura 6. Principio de la osteointegración según Brånemark



Nota: Representación del contacto directo y funcional entre el hueso vivo y la superficie de titanio del implante, fundamento biológico de la implantología oral moderna.

El verdadero salto cualitativo se produjo con los trabajos de Per-Ingvar Brånemark y su equipo en la década de 1960, cuando observaron que el hueso vivo podía integrarse íntimamente con el titanio, sin interposición de tejido fibroso, permitiendo un anclaje sólido y duradero. (5,6). En estudios experimentales con animales, las cámaras de observación de titanio quedaban firmemente adheridas al hueso, de forma que su retirada requería fractura ósea. Esta unión directa hueso–implante fue denominada osteointegración y definida como una “conexión estructural y funcional directa entre el hueso organizado, vivo, y la superficie de un implante sometido a carga”. (5–7).

Desde 1965 se emprendieron tratamientos en pacientes totalmente edéntulos valiéndose de implantes de titanio con superficie mecanizada, a los que sucedieron prótesis fijas atornilladas. Los ensayos pioneros de seguimiento prolongado evidenciaron tasas de supervivencia francamente superiores a las de cualquier diseño implantario previo, hecho que terminó por afianzar el concepto de osteointegración cual cimiento de la implantología moderna. (5–7)

1.2.5. Criterios de éxito y consolidación de la implantología moderna

Con la difusión de los implantes osteointegrados surgió la necesidad de definir criterios de éxito objetivos. Albrektsson y colaboradores propusieron en la década de 1980 una serie de parámetros clínicos y radiográficos, entre los que se incluyen: ausencia de movilidad, ausencia de radiolucidez¹⁵ marginal en la radiografía, pérdida ósea limitada ($\leq 1,5$ mm el primer año y $\leq 0,2$ mm/año posteriormente) y ausencia de dolor, infección o parestesia persistentes. (6,7). Estos criterios han sido ampliamente adoptados y adaptados, y siguen siendo una referencia para evaluar resultados en ensayos clínicos y en la práctica diaria. Paralelamente, revisiones sistemáticas de supervivencia de implantes y prótesis fijas implantosoportadas han mostrado resultados muy favorables a 5 y 10

¹⁴ Proceso biológico mediante el cual un implante se une directa y firmemente al hueso, logrando estabilidad funcional a largo plazo.

¹⁵ Área que se observa más oscura en una radiografía, indicando menor densidad o mayor paso de los rayos X.

años, con tasas globales de éxito superiores al 90 % y patrones de complicaciones bien caracterizados. (4,8). De este modo, la implantología pasó de ser un tratamiento “experimental” o reservado a casos seleccionados a integrarse en la práctica cotidiana de la odontología rehabilitadora.

1.2.6. Evolución de diseños, conexiones y superficies

Con el tiempo, el diseño de los implantes fue refinándose para mejorar la estabilidad primaria, la distribución de cargas y la preservación de la cresta ósea. Tres aspectos han sido particularmente importantes:

1. Macrodiseño del cuerpo implantario

Aparición de implantes cilíndricos y cónicos, con diferentes geometrías de rosca (altura, paso, forma).

Adaptación de diseños específicos para hueso de baja densidad (roscados más agresivos, cuerpos cónicos) o para zonas de alta densidad (roscados más suaves para evitar sobrecompresión). (8,9)

2. Diseño del cuello y plataforma

Cuellos pulidos, roscados o microtexturizados¹⁶ para modular la respuesta de la cresta ósea.

Concepto de “plataforma reducida” o platform switching¹⁷, que desplaza el contacto pilar–implante hacia el centro y ayuda a preservar el hueso marginal. (8,9)

3. Tipo de conexión implante–pilar

De las conexiones externas tipo hexágono se ha evolucionado hacia conexiones internas cilíndricas o cónicas (tipo Morse), que mejoran el sellado, la estabilidad mecánica y la distribución de tensiones. (7–9). En paralelo, las superficies de los implantes pasaron de ser mecanizadas lisas a incorporar tratamientos como arenado y grabado ácido (SLA¹⁸), anodización y recubrimientos bioactivos. Estos tratamientos han demostrado acelerar la osteointegración, aumentar el contacto hueso–implante y mejorar la predictibilidad, especialmente en protocolos de carga temprana o inmediata. (8–10)

1.2.7. De la implantología analógica a la implantología digital

Figura 7. Transición de la implantología analógica a la implantología digital



Durante décadas, la planificación implantológica se realizó con radiografías 2D (periapicales y panorámicas), modelos de yeso y encerados diagnósticos. Las guías quirúrgicas se confeccionaban manualmente a partir de estos modelos, con un grado de precisión muy dependiente de la pericia del clínico y del técnico. (9,10). La introducción de la tomografía computarizada de haz cónico (CBCT)¹⁹ permitió

¹⁶ Superficies de implantes tratadas para presentar microirregularidades que favorecen la adhesión ósea y mejoran la osteointegración.

¹⁷ Concepto implantológico en el que el pilar protésico es de menor diámetro que la plataforma del implante, ayudando a preservar el hueso crestral.

¹⁸ Tratamiento de superficie de implantes mediante arenado con partículas grandes y grabado ácido, que aumenta la rugosidad y mejora la osteointegración.

¹⁹ Tomografía Computarizada de Haz Cónico utilizada en odontología para obtener imágenes tridimensionales precisas del hueso y estructuras maxilofaciales.

visualizar el volumen óseo en tres dimensiones, identificar con precisión estructuras anatómicas críticas y medir distancias y ángulos con mayor exactitud. (11,12) Posteriormente, la aparición de los escáneres intraorales y de los sistemas CAD/CAM permitió:

- Integrar el componente óseo (CBCT) con el componente dentario y de tejidos blandos (modelos digitales) en un mismo entorno virtual.
- Planificar la posición del implante de forma protésicamente guiada, partiendo de la restauración ideal.
- Fabricar férulas quirúrgicas mediante impresión 3D que trasladan con alta precisión la planificación al campo operatorio. (13–15)

1.2.8. Implantología contemporánea: mínima invasión y medicina personalizada

La implantología contemporánea se caracteriza por:

- Un enfoque de mínima invasión, buscando preservación de tejidos, colgajos reducidos o cirugías *flapless*²⁰ cuando están indicadas, y protocolos de regeneración ósea y tisular menos traumáticos. (8,9)
- La incorporación de principios de medicina basada en la evidencia, con protocolos guiados por ensayos clínicos, metaanálisis y guías de consenso. (4,11,12)
- La tendencia hacia una odontología personalizada, en la que las características del paciente (edad, biotipo, comorbilidades, expectativas) modulan la selección de implantes, el número de unidades, el tipo de prótesis y la frecuencia de mantenimiento. (16–18)
- Y, de forma creciente, el uso de tecnologías como la inteligencia artificial y la robótica para mejorar la planificación y la ejecución de procedimientos complejos. (17–20).

1.3. Principios biológicos de la implantología oral

1.3.1. Estructura y remodelación del hueso alveolar

Figura 8. Estructura del hueso alveolar y proceso de remodelación



Nota: Ilustración de la composición cortical y trabecular del hueso alveolar y su comportamiento dinámico frente a la pérdida dentaria y la carga funcional.

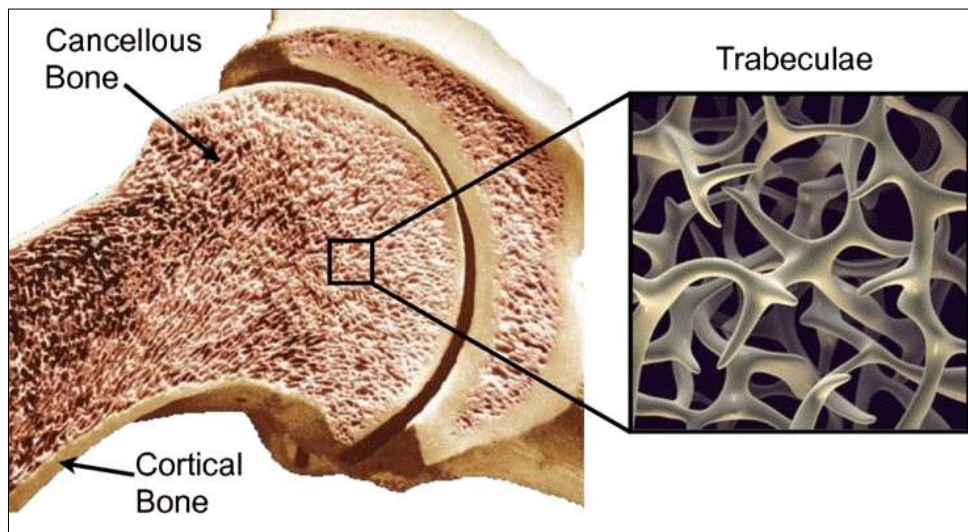
²⁰ Técnica quirúrgica en implantología en la que se coloca el implante sin levantar colgajo, mediante una perforación directa de la mucosa, reduciendo el trauma, el sangrado y el tiempo de recuperación.

El hueso alveolar es un tejido dinámico que responde a las cargas funcionales y a los estímulos biológicos. Tras la pérdida de un diente, se inicia un proceso de remodelación que conduce a la reducción de altura y anchura del reborde alveolar, especialmente en la tabla vestibular, más delgada y vulnerable. (8,9) Esta reabsorción ocurre con mayor intensidad en los primeros meses tras la extracción, pero puede continuar de forma lenta durante años.

Desde el punto de vista histológico el hueso alveolar combina:

- **Hueso cortical** (compacto), es el que aporta rigidez y resistencia a la deformación.
- **Hueso trabecular** (esponjoso), es el que alberga la médula ósea y contribuye a la amortiguación de cargas.

Figura 9. Clasificación de la densidad ósea según Lekholm y Zarb



Nota: Tipificación del hueso alveolar en categorías D1 a D4, suele ser utilizada como referencia clínica para la selección del diseño implantario y la técnica quirúrgica.

La clasificación de Lekholm y Zarb categoriza distintos tipos de densidad ósea (D1–D4) atendiendo a la proporción existente entre cortical y trabecular: así, D1 se define por un hueso casi íntegramente cortical, sumamente denso; D2 presenta una cortical gruesa y trabecular denso; en D3 la cortical resulta fina y el trabecular se muestra más laxo; mientras que D4 exhibe trabecular muy escaso con cortical extremadamente delgada. (8) Dicha taxonomía acontea implicaciones quirúrgicas y protésicas notables: en huesos muy densos (D1), el peligro radica en la sobrecompresión y la necrosis por defecto de irrigación; por su parte, en huesos muy blandos (D4), la dificultad estriba en alcanzar una estabilidad primaria lo bastante sólida. (8,9)

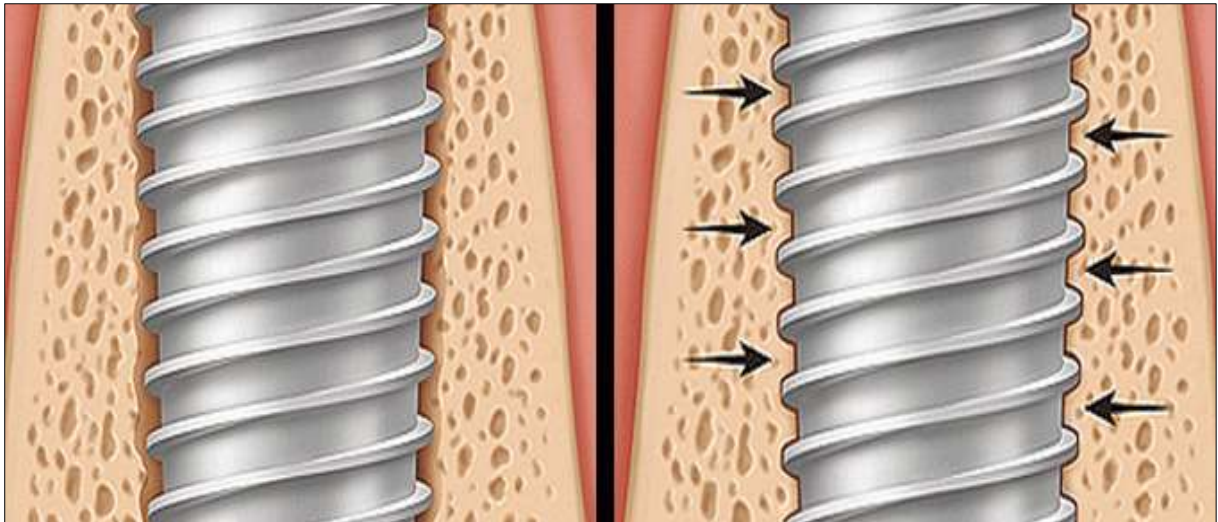
El hueso obedece la ley de Wolff²¹, según la cual su microestructura se adapta a la magnitud y dirección de las cargas; de esta forma, una carga funcional adecuada favorece el mantenimiento del volumen óseo, mientras la infracarga o la sobrecarga crónica pueden desencadenar reabsorción. (7–9)

²¹ El hueso se adapta a las cargas o fuerzas mecánicas que recibe: se forma y refuerza donde hay presión o tensión, y se reabsorbe cuando las fuerzas disminuyen.

1.3.2. Fases de la osteointegración

Tras la inserción de un implante, la osteointegración no es un evento instantáneo, sino un proceso secuencial con varias fases superpuestas:

Figura 10. Fases biológicas de la osteointegración



Nota: Secuencia de eventos celulares y tisulares que conducen a la integración estable del implante, desde la fase hemostática inicial hasta la remodelación ósea a largo plazo.

1. Fase hemostática

- Inmediatamente después de la inserción, se produce sangrado y formación de un coágulo rico en fibrina y plaquetas en el espacio entre el hueso y la superficie del implante.
- Este coágulo actúa como matriz provisional y fuente de factores de crecimiento. (8,9)

2. Fase inflamatoria temprana

- Neutrófilos²² y macrófagos²³ migran al sitio quirúrgico para eliminar detritos y posibles contaminantes.
- Esta inflamación inicial, controlada, es necesaria para activar la cascada reparativa.

3. Fase proliferativa y de formación de tejido de granulación

- Fibroblastos, células endoteliales y células mesenquimales invaden el coágulo, generando tejido de granulación rico en vasos sanguíneos.
- Parte de estas células se diferencian a osteoblastos, responsables de la síntesis de osteoide. (8)

²² Primeras células de defensa que eliminan microorganismos y desechos.

²³ Células que destruyen patógenos y regulan la inflamación y la reparación de tejidos.

4. Fase de formación y mineralización ósea²⁴

- El osteoide se mineraliza progresivamente, así dando lugar a hueso entretejido que rellena el espacio entre la superficie del implante y el hueso receptor.
- Con el tiempo, este hueso entretejido se remodela hacia hueso lamelar más organizado. (6–8)

5. Fase de remodelación y maduración

- A largo plazo, el hueso que está alrededor del implante se somete a ciclos de resorción y formación coordinados por osteoclastos y osteoblastos, manteniendo así un equilibrio dinámico.
- La calidad de esta fase depende de la magnitud, dirección y frecuencia de las cargas oclusales, así como de la salud de los tejidos y de la ausencia de inflamación crónica. (6–8)

La estabilidad primaria (mecánica) del implante, determinada por el diseño y la calidad ósea, es crucial en las primeras semanas; posteriormente, la estabilidad secundaria (biológica) derivada de la nueva formación ósea asegura el anclaje a largo plazo. (7–9)

1.3.3. Superficies implantarias y modulación de la respuesta ósea

Las características de la superficie del implante (rugosidad, energía superficial, composición química) influyen de forma decisiva en la velocidad y la calidad de la osteointegración. Las superficies mecanizadas lisas, utilizadas en los primeros sistemas, demostraron ser eficaces, pero relativamente lentas en cuanto a formación ósea. (5–7)

La introducción de superficies arenadas y grabadas con ácido (SLA), y otras variantes micro y nanoestructuradas, ha permitido:

- Aumentar el área de contacto hueso–implante.
- Mejorar la humectabilidad y la adsorción de las proteínas plasmáticas.
- Favorecer la adhesión y diferenciación de las células osteoblásticas. (8–10)

Estudios clínicos han demostrado que los implantes con superficies moderadamente rugosas presentan:

- Tasas de supervivencia muy elevadas a medio y largo plazo.
- Posibilidad de reducir, los tiempos de cicatrización antes de la carga funcional.
- Mayor predictibilidad, incluso en hueso de densidad comprometida o en protocolos de carga inmediata bien planificados. (4,8–10)

No obstante, superficies muy rugosas pueden ser más susceptibles a la colonización bacteriana si quedan expuestas al medio oral, lo que subraya la importancia de un adecuado control de placa y de programas de mantenimiento para prevenir periimplantitis. (21,22)

²⁴ Proceso de depósito de minerales que aporta dureza y resistencia al hueso.

1.3.4. Biología de los tejidos blandos periimplantarios²⁵

Alrededor del implante, los tejidos blandos cumplen una función barrera fundamental. A diferencia del periodonto natural, donde el ligamento periodontal y las fibras de colágeno se insertan perpendicularmente en el cemento radicular, en el entorno periimplantario:

- No existe ligamento periodontal.
- El tejido conectivo presenta fibras colágenas orientadas más paralela o circunferencialmente a la superficie del implante o del pilar.
- El epitelio de unión establece un contacto con el material del pilar, pero la inserción es distinta a la del epitelio de unión dentario. (23,24)

Este sellado mucoso se considera menos resistente mecánicamente que el de un diente natural, por lo que la integridad del tejido blando y la estabilidad del margen gingival son esenciales para proteger el hueso marginal. Se ha sugerido que:

- Un adecuado grosor de tejido blando y la presencia de mucosa queratinizada alrededor del implante se asocian con menor inflamación, mejor confort del paciente y mayor facilidad para el control de placa.
- La ausencia de un volumen suficiente de tejidos blandos puede predisponer a recesiones, exposición de la parte rugosa del implante y problemas estéticos. (23,24)

La inflamación reversible de los tejidos blandos, con sangrado al sondaje, pero sin pérdida ósea progresiva, se denomina mucositis periimplantaria. Cuando se acompaña de pérdida ósea, se habla de periimplantitis. Ambas entidades se relacionan principalmente con el biofilm bacteriano²⁶, aunque diversos factores de riesgo modulan su aparición y severidad. (21,23,24)

1.3.5. Factores de riesgo sistémicos y locales relacionados con la biología

Los estudios contemporáneos han identificado una serie de factores de riesgo que condicionan la salud periimplantaria:

- *Historia de periodontitis*: los pacientes con antecedentes de periodontitis crónica presentan mayor prevalencia de periimplantitis y mayor pérdida ósea marginal, incluso cuando reciben tratamiento periodontal previo. (21,22)
- *Tabaquismo*: el consumo de tabaco se asocia con peor respuesta inmune, alteraciones vasculares y cambios en el microbiota, lo que puede aumentar el riesgo de fracaso implantario y enfermedades periimplantarias. (21,22)
- *Diabetes mellitus mal controlada*: los estados de hiperglucemia crónica se asocian con cicatrización deficiente, susceptibilidad a infecciones y posible incremento del riesgo de periimplantitis; este riesgo disminuye cuando la diabetes está bien controlada. (21)
- *Higiene oral deficiente y falta de mantenimiento*: la acumulación del biofilm, es el factor etiológico principal de mucositis y periimplantitis; los pacientes que no siguen un programa de

²⁵ Término que se refiere a los tejidos y estructuras que rodean a un implante dental, como el hueso y la encía que lo soportan.

²⁶ Comunidad organizada de bacterias adheridas a una superficie, protegidas por una matriz, que favorece la persistencia de infecciones alrededor de dientes o implantes.

mantenimiento, tienen una mayor probabilidad de presentar complicaciones biológicas. (21,23,24)

1.4. Principios mecánicos y de diseño implantario

1.4.1. Conceptos básicos de biomecánica implantaria

Desde el punto de vista mecánico, el implante dentario se comporta como un pilar rígido anclado directamente en el hueso, sin la amortiguación del ligamento periodontal. Por ello:

- La deformación elástica frente a las fuerzas oclusales es menor que en un diente natural.
- Las cargas excéntricas pueden generar tensiones concentradas en la cresta ósea y en los componentes protésicos. (6–8)

La biomecánica implantaria, persigue distribuir las fuerzas dentro de rangos aceptables para el hueso y los materiales. Algunos conceptos clave a continuación:

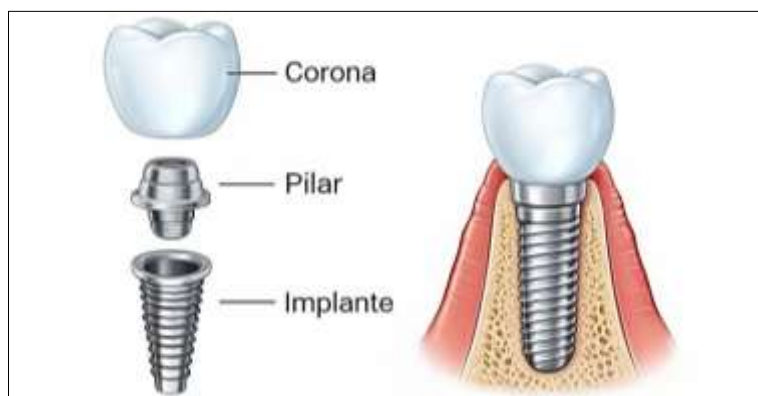
- *Fuerzas axiales* (paralelas al eje del implante), generalmente las mejor toleradas.
- *Fuerzas laterales* u oblicuas, son las que generan momentos de flexión y tensiones más desfavorables.
- *Cantiléver*: extensión protésica sin apoyo directo en implantes, la cual aumenta el brazo de palanca y el riesgo de sobrecarga. (4,8)

La ausencia de ligamento periodontal también implica una menor capacidad propioceptiva, de modo que el paciente puede no percibir sobrecargas con la misma sensibilidad que en dientes naturales, lo que exige un ajuste oclusal cuidadoso.

1.4.2. Macrodiseno del implante y estabilidad primaria

El macrodiseno del implante (forma general, longitud, diámetro, patrón de roscas) influye directamente en la estabilidad primaria. En hueso de baja densidad, los implantes cónicos con roscas más agresivas pueden compactar el hueso y mejorar el torque de inserción; en hueso muy denso, la prioridad es evitar sobrecompresión y necrosis, por lo que se utilizan roscas menos agresivas y protocolos de fresado más amplios. (8,9)

Figura 11. Influencia del macrodiseno del implante en la estabilidad primaria



Nota: Comparación de diferentes longitudes, diámetros y geometrías de implantes y su relación con la distribución de cargas y la estabilidad inicial.

La longitud y el diámetro del implante determinan el área de contacto con el hueso:

- Implantes más largos aumentan la superficie disponible, pero su uso puede estar limitado por estructuras anatómicas (seno maxilar, canal mandibular).
- Implantes de mayor diámetro pueden mejorar la distribución de cargas en sentido transversal, pero requieren suficiente anchura ósea; además, diámetros excesivos pueden comprometer la irrigación del hueso cortical. (8,9)

En los últimos años se ha explorado el uso de implantes cortos y ultracortos como alternativa a injertos óseos en zonas con altura limitada, con resultados aceptables cuando se seleccionan correctamente los casos y se diseñan prótesis con cantiléver mínimos. (8)

1.4.3. Conexión implante–pilar y preservación ósea crestal

La conexión implante–pilar es un punto crítico desde el punto de vista mecánico y biológico. Las conexiones externas clásicas tipo hexágono mostraron buena supervivencia, pero presentaban limitaciones en cuanto a estabilidad frente a fuerzas oblicuas y sellado frente a la microfiltración. (6,7)

Las conexiones internas y, especialmente, las conexiones cónicas tipo Morse han demostrado:

- Mejor resistencia a los micromovimientos y al aflojamiento de tornillos.
- Menor micro-grieta en la interfase, lo que puede reducir la colonización bacteriana.
- Posible mejor preservación de la cresta ósea marginal debido a una distribución más favorable de las cargas. (7–9)

El concepto de platform switching (uso de pilares más estrechos que la plataforma del implante) también ha mostrado efectos positivos en la preservación ósea crestal, al alejar el microgap²⁷ del borde del hueso y redistribuir las tensiones hacia el interior de la plataforma. (8,9)

1.4.4. Diseño protésico y distribución de cargas

El diseño de la prótesis implantosoportada es tan importante como el diseño del propio implante. Algunos principios generales de biomecánica protésica incluyen:

- Minimizar los cantiléver en extensión y controlar su longitud según el número de implantes y la calidad ósea.
- Diseñar oclusiones funcionalmente equilibradas, evitando contactos prematuros e interferencias excéntricas.
- Ajustar el ancho oclusal y la altura coronaria, para así reducir los momentos de flexión, especialmente en corona única en sector posterior. (4,8)

En la materia de las rehabilitaciones de arco completo, la disposición de los implantes —tal es el caso de los protocolos tipo All-on-4— ha de planificarse con el fin de optimizar la longitud de la

²⁷ Espacio microscópico que puede formarse entre el implante y el pilar protésico, donde pueden acumularse bacterias y favorecer inflamación periimplantaria.

«viga» protésica sin que ello suponga sobrepasar la capacidad de carga de los implantes distales. (4,8)

1.4.5. Fatiga, complicaciones mecánicas y mantenimiento

Como cualquier estructura sometida a cargas repetidas, los implantes y sus componentes pueden sufrir procesos de fatiga. Las complicaciones mecánicas incluyen:

- Aflojamiento o fractura de tornillos de pilar.
- Fractura de pilares, barras o estructuras protésicas.
- Fractura de recubrimientos cerámicos. (4,8)

La aparición de estas complicaciones depende de:

- El diseño y el material de los componentes.
- La distribución de cargas y la presencia de bruxismo u otros hábitos parafuncionales.
- El mantenimiento y ajuste periódico de la oclusión.

Un diseño adecuado, combinado con control de hábitos y revisiones periódicas, reduce de forma significativa la incidencia de fallos mecánicos, contribuyendo al éxito global del tratamiento.

1.5. Factores del paciente y del entorno clínico

Aunque biología, mecánica y tecnología constituyen los pilares técnicos de la implantología, el éxito clínico se ve fuertemente influido por las características del paciente y por la organización del entorno asistencial.

1.5.1. Condiciones sistémicas: diabetes, osteoporosis y otros

La diabetes mellitus es uno de los factores sistémicos más estudiados. Los pacientes diabéticos mal controlados pueden presentar:

- Retraso en la cicatrización.
- Mayor susceptibilidad a infecciones.
- Posible aumento del riesgo de pérdida ósea marginal y de periimplantitis. (21)

No obstante, la evidencia sugiere que, en pacientes con buen control metabólico, las tasas de supervivencia implantaria pueden aproximarse a las de pacientes no diabéticos, siempre que se implementen protocolos quirúrgicos prudentes y un mantenimiento estricto. (21)

Otros factores sistémicos importantes a considerar:

- *Osteoporosis y fármacos que afectan el remodelado óseo* (bifosfonatos, denosumab), los cuales pueden modificar la respuesta del hueso y aumentar el riesgo de osteonecrosis en ciertas circunstancias determinadas.
- *Tratamientos oncológicos*, tales como radioterapia en cabeza y cuello, que afectan la vascularización y la capacidad reparativa ósea.
- *Inmunosupresión y enfermedades autoinmunes*, mismas que exigen evaluación conjunta con el médico tratante.

La valoración preoperatoria debe incluir historia médica detallada, medicación, pruebas complementarias cuando sea necesario y, en muchos casos, una interconsulta **con** el médico responsable del paciente.

1.5.2. Hábitos de riesgo: tabaquismo, bruxismo y consumo de sustancias

El tabaquismo es un factor de riesgo consolidado para el fracaso de implantes y para enfermedades periimplantarias. Los fumadores presentan mayor prevalencia de pérdida ósea marginal, mucositis y periimplantitis, así como tasas de supervivencia ligeramente inferiores a medio y largo plazo. (21,22)

Además del tabaco, el bruxismo (apretamiento o rechinar) puede generar sobrecargas que pueden afectar las restauraciones, especialmente en combinaciones de prótesis extensas y número limitado de implantes. En estos casos se recomienda:

- Diseños protésicos más robustos.
- Ajustes oclusales minuciosamente cuidadosos.
- Uso de férulas de descarga nocturnas.

El consumo excesivo de alcohol y otras sustancias también puede asociarse con mala higiene, dieta desequilibrada y baja adherencia a los controles, lo que se considera factores que incrementan el riesgo de complicaciones biológicas.

1.5.3. Factores locales: periodontitis previa, biotipo gingival e higiene

La historia de periodontitis es probablemente el factor local más importante para la salud periimplantaria. Los pacientes con periodontitis previa, aunque tratados, muestran mayor riesgo de periimplantitis y pérdida ósea marginal que los pacientes periodontalmente sanos. (21,22)

En estos casos, el protocolo debería incluir:

- Tratamiento periodontal exhaustivo previo a la colocación de implantes.
- Información clara al paciente sobre su mayor riesgo relativo.
- Programas de mantenimiento más frecuentes y estrictos.

El biotipo gingival ²⁸(fino o grueso) y el volumen de tejidos blandos también influyen:

- Biotipos finos son más susceptibles a recesiones y a la visibilidad de estructuras metálicas.
- En determinados casos, se indican técnicas de aumento de tejidos blandos (injertos de tejido conectivo, matrices colágenas) para mejorar la estabilidad y la estética periimplantaria. (23,24)

La higiene oral y la motivación del paciente son elementos determinantes: sin una colaboración activa en el control de placa, la probabilidad de mucositis y periimplantitis se incrementa notablemente, incluso con un tratamiento técnicamente impecable. (21,23,24)

1.5.4. El entorno clínico, la experiencia en conjunto al trabajo en equipo

Es usual que el entorno en el que se desarrolla la implantología, condiciona los desenlaces. A saber: la pericia y formación del implantólogo; la vigencia de protocolos estandarizados de diagnóstico,

²⁸ Características del grosor y forma de la encía alrededor de los dientes o implantes, que puede ser fino o grueso y condiciona la respuesta clínica y estética.

planificación y mantenimiento; y la articulación con el laboratorio y con demás especialistas — periodoncia, prostodoncia, radiología, cirugía maxilofacial—. Estos factores determinan la aptitud para prever complicaciones, elegir la alternativa terapéutica correcta y llevar a cabo procedimientos de modo seguro y reproducible. (4,14,15). En la era digital, además, la implantología se ha convertido en una disciplina esencialmente interdisciplinar, donde el éxito depende de una comunicación fluida y de la integración de distintos perfiles profesionales.

1.6. Importancia de la tecnología en la práctica clínica actual

1.6.1. Del diagnóstico 2D al ecosistema digital 3D

La combinación de CBCT, escáner intraoral y software de planificación conforma un ecosistema digital que ha cambiado la forma de diagnosticar y planificar la implantología:

- El CBCT proporciona información tridimensional del volumen óseo, densidad relativa y relación con estructuras anatómicas críticas. (11–13)
- Merced al escáner intraoral se obtienen modelos digitales precisos de las arcadas, la oclusión y los tejidos blandos. (15,16)
- De tal suerte, el software viabiliza superponer ambos volúmenes de datos, proyectar la posición ideal de los implantes supeditada a la prótesis futura y simular supuestos diversos (número de implantes, longitudes, angulaciones). (14,15)

Por ende, dicho enfoque impulsa una implantología protésicamente guiada mediante la cual primeramente se delimita el resultado restaurador anhelado y con posterioridad se ubican los implantes en coherencia, en detrimento de insertar implantes «donde hay hueso» para subsecuentemente adaptar la prótesis.

1.6.2. CBCT: indicaciones y criterios de uso responsable

Figura 12. Tomografía computarizada de haz cónico (CBCT) aplicada a implantología



Nota: Imagen tridimensional utilizada para evaluar volumen óseo, estructuras anatómicas críticas y planificación precisa de implantes bajo criterios de radioprotección.

El CBCT se ha convertido en herramienta casi indispensable en muchos casos de implantología, pero su uso debe regirse por criterios de justificación y optimización:

- Está especialmente indicado cuando la información de radiografías 2D es insuficiente para planificar con seguridad (por ejemplo, en maxilares atróficos, proximidad a canal mandibular, senos maxilares neumáticos, defectos óseos complejos). (11–13)
- Deben emplearse campos de visión limitados (FOV reducido) y parámetros de exposición ajustados al mínimo necesario, siguiendo el principio ALARA/ALADA.²⁹(11–13)

En el contexto de la implantología digital, el volumen CBCT se exporta en formato DICOM³⁰ y se integra en los softwares de planificación, donde se realiza el trazado de estructuras anatómicas y la medición de distancias críticas.

1.6.3. Escáneres intraorales y registros digitales

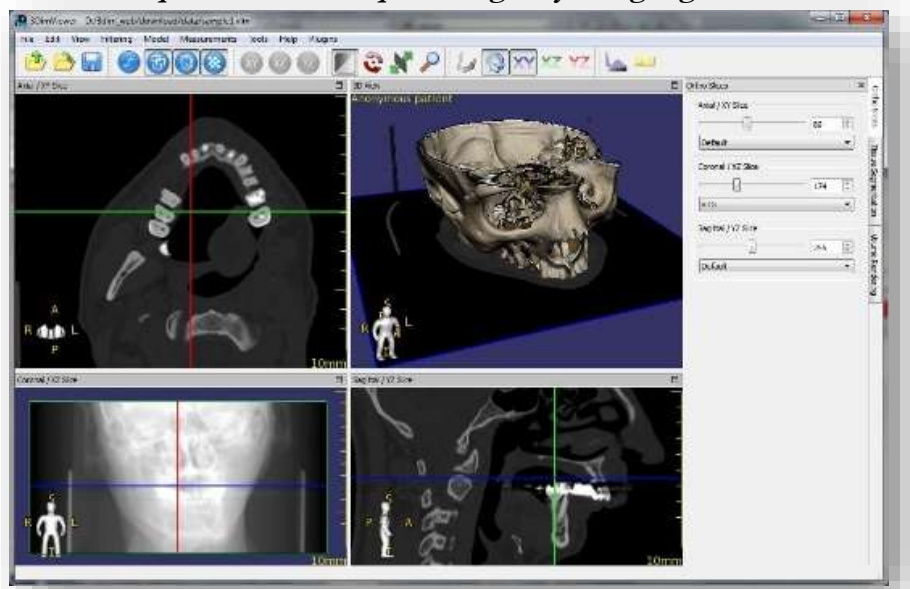
Los escáneres intraorales aportan ventajas tanto al clínico como al paciente:

- Eliminan la necesidad de impresiones convencionales en muchos casos, aumentando la comodidad.
- Reducen la variabilidad y las posibles distorsiones asociadas a materiales de impresión, vaciado de modelos y transporte.
- Pueden mejorar la visualización inmediata del resultado y la detección de áreas no escaneadas. (15,16)

Entonces en implantología, el uso de scanbodies³¹ específicos atornillados al implante o al pilar permite transferir la posición tridimensional exacta del implante al modelo digital. En rehabilitaciones complejas, se han desarrollado protocolos de escaneo segmentado y técnicas híbridas (combinación de escaneos intraorales y de modelos impresos) para minimizar errores acumulativos.

1.6.4. Software de planificación y cirugía guiada

Figura 13. Software de planificación implantológica y cirugía guiada



Nota: Entorno digital que integra datos DICOM y STL para la planificación protésicamente guiada y el diseño de férulas quirúrgicas.

²⁹ Principios de radioprotección que indican que la dosis de radiación debe mantenerse tan baja como sea razonablemente posible (ALARA) o diagnósticamente aceptable (ALADA), sin comprometer la calidad diagnóstica.

³⁰ Formato estándar para almacenar, transmitir y visualizar imágenes médicas y odontológicas digitales, como radiografías y CBCT.

³¹ Dispositivos colocados sobre implantes o pilares que permiten al escáner intraoral registrar con precisión la posición y orientación del implante en el flujo digital.

Los softwares implantológicos permiten:

- Integrar DICOM (CBCT) y STL (modelo digital).
- Definir la prótesis objetivo (dientes virtuales, encerado digital).
- Colocar implantes virtuales respetando volúmenes óseos, distancias de seguridad y perspectivas protésicas.
- En aras de confeccionar las férulas quirúrgicas destinadas a la cirugía guiada estática o bien exportar la planificación a sistemas de cirugía guiada dinámica o robótica. (14,17–20)

La cirugía guiada estática se fundamenta, primordialmente, en férulas impresas en 3D provistas de cilindros o sleeves que constriñen la posición y el angulado de fresas e implantes. En cambio, la cirugía guiada dinámica y la robótica recurren a sistemas de navegación en tiempo real o brazos robóticos que replican el plan digital con gran fidelidad. (17–20)

Dichas tecnologías han evidenciado que son capaces de elevar la precisión en la colocación de implantes, minimizar el riesgo de perforaciones y viabilizar abordajes mínimamente invasivos en supuestos seleccionados. No obstante, exigen una curva de aprendizaje y no suplen la imperiosa necesidad de una valoración clínica rigurosa.

1.6.5. CAD/CAM e impresión 3D aplicados a la implantología

Los sistemas CAD/CAM permiten diseñar y fabricar:

- Pilares personalizados (abutments) que optimizan el perfil de emergencia y la adaptación a la anatomía gingival.
- Coronas unitarias y puentes sobre implantes en cerámicas de alta resistencia o zirconia monolítica.
- Barras y estructuras de arco completo para prótesis híbridas.
- Férulas quirúrgicas y modelos de trabajo. (14,15,17)

La aplicación conjunta de CAD/CAM e impresión 3D en implantología no solo incrementa la precisión del diseño y la ejecución clínica, sino que también fortalece la estandarización del proceso al reducir variaciones inherentes a técnicas analógicas y a la manipulación manual del laboratorio. En virtud de lo expuesto, dicha combinación redundará en predictibilidad protésica puesto que permite un ajuste más controlado de pilares y restauraciones; de forma que, simultáneamente, optimiza el diálogo interdisciplinario entre el odontólogo y el laboratorio a través de archivos digitales verificables (STL, DICOM y flujos integrados). Por añadidura, la fabricación aditiva reporta ventajas relevantes tanto en la fase prequirúrgica como en la restauradora dado que facilita la validación de la rehabilitación planificada gracias a modelos y provisionales de prueba, de manera que se alcanza un mejor control del perfil de emergencia, la estética y la oclusión previo a la entrega definitiva. (14,15,17)

1.6.6. Inteligencia artificial y robótica: apoyo a la decisión y ejecución

La incorporación de inteligencia artificial (IA) en la implantología se encuentra en pleno desarrollo. Entre sus aplicaciones actuales y emergentes se incluyen:

- Detección y clasificación automática de implantes en radiografías y CBCT.
- Segmentación automática de estructuras anatómicas (canal mandibular, senos, dientes).
- Sugerencias automatizadas de posicionamiento de implantes en función de la anatomía y la prótesis objetivo.
- Predecir las posibles complicaciones, a partir de variables clínicas, radiográficas y de estilo de vida. (17–19)

En el presente, la robótica y la cirugía asistida por robot suman un porcentaje adicional de precisión en la ejecución, garantizando que la posición real de los implantes se ajuste de forma muy estrecha al plan digital preoperatorio. (20)

De esa manera, ya en lo práctico, los algoritmos actúan cual segunda lectura clínica que opera a modo de alerta frente a determinados riesgos anatómicos, inconsistencias del plan o desviaciones previsibles; mientras tanto, la asistencia robótica —en sinergia con la navegación dinámica y la retroalimentación en tiempo real— coadyuva a minimizar errores de angulación, profundidad y emergencia protésica, con especial incidencia en rehabilitaciones complejas y en enclaves anatómicamente críticos. (17–20).

SISTEMAS CAD/CAM Y DISEÑO ASISTIDO EN IMPLANTOLOGÍA DIGITAL



2.1. Introducción general a los sistemas CAD/CAM en implantología

La introducción de los sistemas de diseño asistido por computadora (CAD) y fabricación asistida por computadora (CAM) ha transformado de forma radical la manera en que se conciben, planifican y ejecutan las rehabilitaciones sobre implantes. Lo que antes dependía de encerados manuales, modelos de yeso y procedimientos de laboratorio altamente artesanales, hoy puede desarrollarse en entornos virtuales con un elevado grado de precisión, trazabilidad y capacidad de réplica. (9,14,15,25–27)

En el área de implantología, la tecnología CAD/CAM interviene en múltiples niveles del tratamiento:

- El diseño y fabricación de pilares personalizados (abutments) sobre implantes.
- La confección de las coronas unitarias, puentes y estructuras de arco completo.
- La producción de barras para sobredentaduras y prótesis híbridas.
- En la elaboración de férulas quirúrgicas para cirugía guiada.
- El diseño de prótesis provisionales inmediatas en protocolos de carga temprana o inmediata. (14,15,25–29)

Además, los sistemas CAD/CAM se integran con otros componentes del ecosistema digital, como el CBCT, los escáneres intraorales y, más recientemente, la impresión 3D y las herramientas basadas en inteligencia artificial. (11–16,17–20,25–30) Esta integración permite que los datos clínicos del paciente fluyan desde la fase diagnóstica hasta la rehabilitación final dentro de un mismo entorno digital, reduciendo la dependencia de modelos físicos y acortando los tiempos de tratamiento.

Desde el punto de vista conceptual, el uso de CAD/CAM en implantología está alineado con la tendencia hacia una odontología personalizada, donde estructuras y prótesis se adaptan a la anatomía exacta del paciente, a su biotipo gingival, a la posición tridimensional real de los implantes y a los requerimientos estéticos y funcionales de cada caso. (16–18,25,26)

En este capítulo se desarrollarán los fundamentos del diseño digital, el flujo de trabajo típico “del escáner a la prótesis” y las principales ventajas, limitaciones y aplicaciones clínicas de los sistemas CAD/CAM en implantología digital, con énfasis en su papel presente y en su proyección futura. (14,15,25–30)

2.2. Fundamentos del diseño digital y la fabricación asistida por computadora

2.2.1. Conceptos básicos de CAD y CAM

El término CAD (Computer-Aided Design) se refiere al uso de software para crear modelos tridimensionales o bidimensionales que representan objetos físicos. En odontología e implantología, el CAD se utiliza para:

- Diseñar coronas, puentes y prótesis completas.
- Modelar pilares personalizados anatómicos.
- Simular barras, estructuras metálicas y bases de prótesis híbridas.
- Delimitar el contorno y el perfil de emergencia en relación con los tejidos blandos. (25–28)

Las siglas CAM (Computer-Aided Manufacturing) se refiere al proceso mediante el cual los modelos digitales diseñados en CAD se transforman en objetos físicos mediante técnicas de fabricación, principalmente:

- *-Sustractivas*: fresado de bloques o discos de cerámica, zirconia, resina o metal.
- *+Aditivas*: impresión 3D por fotopolimerización, sinterización selectiva o fusión de polvos metálicos. (25,27–30)

Estos dos componentes no son entidades aisladas, sino partes de un mismo flujo: el diseño (CAD) genera un archivo que se introduce en el módulo CAM, donde se definen trayectorias de fresado o capas de impresión y se ejecuta la fabricación en equipos específicos. (25–30)

2.2.2. Arquitectura de un sistema CAD/CAM en implantología

Un sistema CAD/CAM típico aplicado a implantología incluye tres pilares principales:

1. Módulo de adquisición de datos

- Escáner intraoral para capturar la geometría de los dientes, implantes (a través de scanbodies) y tejidos blandos.
- Escáner de mesa (de laboratorio) que se usa para digitalizar modelos impresos o colados.
- Integración de CBCT y los otros estudios radiológicos a través de los archivos DICOM. (11–16,25–27)

2. Software o aplicaciones de diseño (CAD)

- Librerías de implantes, las conexiones y los componentes protésicos.
- Recursos de modelado anatómico, el ajuste oclusal y diseño de contornos.
- Aplicativos para definir espesores mínimos, puntos de contacto, emergencias transmucosas y ejes de inserción. (14,15,25–30)

3. Unidad de fabricación (CAM)

- Las fresadoras pueden ser de 3, 4 o hasta 5 ejes para el tallado de bloques o discos.
- Impresoras en 3D que operan con resina, cera calcinable, materiales provisionales, metal.
- Sistemas de sinterización, cocción o postcurado según requiera el material. (25,27–30,31–33)

Considerando el modelo de trabajo, tales componentes pueden hallarse integrados en un sistema cerrado —único fabricante que rige hardware, software y materiales— o bien en un sistema abierto, donde el clínico y el laboratorio combinan elementos de distintos proveedores intercambiando archivos mediante formatos estándar (STL, PLY, OBJ). (25–28).

Los sistemas cerrados suelen ofrecer mayor estabilidad y soporte técnico, mientras que los abiertos tienden a ser más flexibles y favorecen la interoperabilidad entre diferentes marcas y tecnologías. (25–28)

2.2.3. Materiales utilizados en CAD/CAM para implantología

Los sistemas CAD/CAM han ampliado el abanico de materiales disponibles para la rehabilitación sobre implantes. Entre los más utilizados se encuentran:

1. Cerámicas vítreas y reforzadas

- Feldespáticas³², disilicato de litio y otras variantes.
- Ofrecen alta estética, translucidez y buena integración cromática, especialmente en dientes anteriores.
- Su resistencia mecánica es adecuada para coronas unitarias y pequeños puentes; en rehabilitaciones extensas sobre implantes, su uso requiere un diseño cuidadoso para evitar fracturas. (29–33)

2. Zirconia (óxido de zirconio estabilizado)

- Presenta elevada resistencia flexural³³ y tenacidad a la fractura, lo que la hace apropiada para puentes largos y estructuras de arco completo.
- Puede emplearse como zirconia monolítica o como estructura recubierta con cerámica.
- Las nuevas generaciones de zirconia multicapa buscan equilibrar resistencia y propiedades ópticas. (29–33)

3. Aleaciones metálicas para fresado o sinterización

- Cromo-cobalto (Co-Cr) y titanio principalmente.
- Utilizadas para barras, estructuras metálicas y, en ocasiones, coronas o puentes totalmente metálicos en sectores posteriores.
- Pueden fabricarse por fresado de discos o por técnicas aditivas (sinterización selectiva o fusión láser). (29–33)

4. Polímeros de alto rendimiento y resinas

- PMMA³⁴ de alta densidad para provisionales de larga duración.
- PEEK³⁵ y otros polímeros reforzados para estructuras ligeras en determinadas indicaciones.
- Resinas que son específicas para impresión 3D de provisionales, guías quirúrgicas y modelos. (31–33)

³² Cerámicas dentales estéticas usadas principalmente en restauraciones, caracterizadas por su alta translucidez.

³³ Capacidad de un material para resistir fuerzas de flexión sin fracturarse.

³⁴ Polimetilmetacrilato; material acrílico ligero y económico, utilizado en prótesis provisionales.

³⁵ Polímero de alto rendimiento, biocompatible y resistente, usado comúnmente en implantología y prótesis por su durabilidad y estabilidad.

La elección del material depende netamente de la indicación clínica, el tipo de prótesis, la localización (anterior vs posterior), las expectativas estéticas, el tipo de oclusión y los recursos disponibles en la clínica y el laboratorio. (29–33)

2.2.4. Sistemas CAD/CAM de sillón y de laboratorio

Figura 14. *Sistemas CAD/CAM de sillón y de laboratorio*



Nota: Comparación entre flujos de trabajo *chairside* y de laboratorio en implantología digital, destacando ventajas organizativas y clínicas de cada modelo.

Desde el punto de vista organizativo, se distinguen dos grandes modelos de implementación:

- **Sistemas de sillón (*chairside*)**
 - El escaneado, diseño y fabricación se realizan en la misma consulta, frecuentemente en una única sesión.
 - Se pueden fabricar coronas unitarias y realizar pequeñas rehabilitaciones de forma inmediata, lo que resulta muy atractivo para el paciente.
 - Requieren una considerable inversión en equipos de fresado y software, y una curva de aprendizaje para el especialista. (25–28,31)
- **Sistema de laboratorio**
 - El especialista toma la información y datos (escaneo intraoral o modelos físicos) y los envía al laboratorio, donde se realiza el diseño y la fabricación.
 - Normalmente los laboratorios facilitan mayor variedad de materiales y equipos.
 - También favorecen la participación de un técnico experto, que puede dedicar más tiempo y detalle al diseño protésico. (25–28)

En materia de implantología, el modelo de laboratorio sigue siendo ampliamente utilizado, singularmente en supuestos complejos y rehabilitaciones extensas. Sin embargo, los sistemas de sillón han ido ganando terreno en coronas unitarias sobre implantes y provisionales inmediatos, más aún en entornos con elevada carga asistencial y sólida infraestructura tecnológica. (25–28,31).

2.3. Proceso completo: del escaneo al diseño y producción de prótesis

2.3.1. Adquisición de datos: escáner intraoral, escáner de mesa y CBCT

El flujo digital comienza con la adquisición de datos precisos sobre la situación intraoral:

1. Escáner intraoral

Figura 15. *Escaneo intraoral para rehabilitaciones sobre implantes*



Nota: Captura digital de tejidos dentarios y periimplantarios mediante escáner intraoral, utilizando *scanbodies* para transferir la posición tridimensional del implante.

- Captura la geometría de dientes, encía y, en el caso de rehabilitaciones sobre implantes, la posición de estos mediante *scanbodies* atornillados.
- Genera archivos en formato STL o PLY que contienen la nube de puntos y la malla de la superficie escaneada.
- La calidad del escaneo depende de aspectos como la técnica, la humedad, la accesibilidad y el tipo de escáner. (15,16,25–27)

2. Escáner de mesa (laboratorio)

Figura 16. *Escáner de mesa para digitalización de modelos*



Nota: Dispositivo de laboratorio empleado para convertir modelos físicos en archivos digitales de alta precisión dentro del flujo CAD/CAM.

- Son usados para digitalizar modelos físicos vaciados en yeso o impresos en 3D.
- Pueden ser de luz estructurada o láser y ofrecen una muy alta precisión para el laboratorio.
- Son de especial interés y utilidad cuando se combina un flujo convencional (impresión y modelo) con un flujo digital. (25–28)

3. CBCT y otros estudios radiológicos

- Le proporcionan al especialista, información tridimensional sobre el hueso, la posición de los implantes y las estructuras anatómicas.
- En el flujo prostodóntico³⁶, el CBCT se integra con el modelo intraoral cuando es necesario armonizar restauraciones con la anatomía ósea o evaluar espacios protésicos. (11–13,25,26)

Es fundamental que esta fase de adquisición se realice con protocolos estandarizados, ya que los errores en esta etapa inicial se propagan al resto del proceso y pueden comprometer el ajuste de la prótesis final. (25–30)

2.3.2. Registro y alineación de archivos digitales

- Cuando intervienen distintas fuentes de datos (escáner intraoral, escáner de mesa, CBCT), es necesario registrar y alinear los archivos en un mismo sistema de coordenadas.
- En la mayoría de softwares CAD implantológicos, el modelo intraoral (STL) se alinea con la librería de implantes a través de los scanbodies, que actúan como referencia geométrica.
- Si se integra el CBCT, el archivo DICOM se fusiona con el STL mediante puntos anatómicos comunes o mediante algoritmos de ajuste automático. (14,15,25–27)

Una vez alineados, el software “reconoce” la posición tridimensional exacta de los implantes en relación con los tejidos blandos y el resto de la arcada, lo que permite diseñar pilares y prótesis altamente personalizados. (14,15,25–28)

2.3.3. Diseño protésico sobre implantes

Figura 17. *Diseño protésico digital sobre implantes*



Nota: Proceso de modelado virtual de coronas, puentes o estructuras implantosoportadas, considerando oclusión, estética y perfil de emergencia.

El diseño protésico en el entorno CAD para implantología incluye varios pasos:

³⁶ Secuencia ordenada de pasos clínicos y de laboratorio para el diagnóstico, planificación, diseño, fabricación y colocación de prótesis dentales, frecuentemente apoyado en tecnología digital.

1. Definición de la prótesis objetivo

- Se selecciona el tipo de restauración: corona atornillada, corona cementada sobre pilar, puente, barra, prótesis híbrida, sobredentadura, etc.
- El software permite colocar dientes virtuales (encerado digital) en la posición ideal, respetando la oclusión, la estética y la fonética. (14,15,25–30)

2. Selección de componentes protésicos

- Se elige el sistema implantológico (marcas, conexiones) y se cargan las librerías digitales correspondientes.
- Se dilucida la conveniencia de emplear pilares estandarizados o bien pilares personalizados.
- Para fabricar los pilares personalizados, primero se diseña la emergencia transmucosa, la altura del margen y el contorno en relación con los tejidos blandos. (14,15,29–33)

3. Modelado anatómico y ajuste oclusal

- El especialista se encarga de ajustar espesores mínimos de material, contactos proximales, contactos oclusales y emergencias en relación con la encía.
- El software facilita y muestra mapas de espesores y guías de contactos, lo que ayuda a equilibrar resistencia mecánica y estética. (29–33)

4. Control de interferencias y verificación virtual

- Antes de pasar al CAM, se simulan los contactos en céntrica y excursiones, se revisan zonas de posible interferencia y se realizan ajustes.
- En prótesis atornilladas, se cuida la ubicación del orificio del tornillo para situarlo en zonas menos visibles y biomecánicamente favorables. (4,8,25–30).

2.3.4. Fabricación: fresado sustractivo vs impresión 3D aditiva

Una vez definido el diseño, el archivo pasa al módulo CAM:

1. Fresado sustractivo

Figura 18. *Fabricación sustractiva mediante fresado CAD/CAM*



Nota: Producción de restauraciones implantoportadas mediante tallado de bloques o discos de material, destacando su precisión dimensional.

- El sistema genera trayectorias de herramienta para fresar el objeto a partir de un bloque o disco de material.

- La precisión depende del número de ejes de la fresadora, del diámetro mínimo de las fresas y de los parámetros de fresado (velocidad, paso, profundidad).
- Es la técnica más extendida para coronas, puentes, estructuras de zirconia, PEEK, PMMA y aleaciones metálicas en disco. (25,27–31,33)

2. Impresión 3D aditiva

Figura 19. Fabricación aditiva mediante impresión 3D en implantología



Nota: Proceso de manufactura capa por capa utilizado para férulas quirúrgicas, provisionales y modelos, integrado al flujo digital.

- Se basa en la deposición o polimerización capa a capa del material (resina, cera calcinable, metal, etc.).
- Es especialmente útil para férulas quirúrgicas, provisionales, modelos y, cada vez más, para estructuras provisionales o definitivas en resinas de alta prestación.
- La precisión depende de la resolución en X, Y y Z, de la calidad de la resina y del procesado posterior (lavado, fotopolimerización final). (31–33)

En ambos casos, una vez fabricada la estructura, se llevan a cabo procesos de acabado:

- Eliminación de soportes o canales de fresado.
- Ajuste fino en el modelo o sobre análogos.
- Glaseado, maquillado o recubrimiento cerámico, si procede.

2.3.5. Ajuste clínico, verificación y mantenimiento digital

La última fase del flujo consiste en comprobar, en boca, que el resultado coincide con lo planificado:

- Verificación del ajuste pasivo en estructuras múltiples mediante pruebas clínicas y radiográficas.
- Comprobación de contactos proximales y oclusales y ajuste selectivo si es necesario.
- Evaluación del perfil de emergencia y de la integración con los tejidos blandos, especialmente en zona estética. (4,8,23,24,29–33)

Una ventaja colateral del flujo digital radica en que, una vez ratificado el diseño definitivo, el archivo permanece archivado y susceptible de reutilización ante fractura, extravío o necesidad de replicar la prótesis, eludiendo la reiteración íntegra del proceso. (25–30)

2.4. Ventajas de los sistemas CAD/CAM en implantología

Figura 20. Ventajas clínicas del flujo CAD/CAM en implantología



Nota: Representación de los beneficios asociados a la implantología digital, incluyendo precisión, eficiencia, personalización y trazabilidad.

2.4.1. Precisión, ajuste marginal y pasividad de las estructuras

Varios estudios han demostrado que, cuando se siguen protocolos adecuados, las restauraciones implantosoportadas fabricadas mediante CAD/CAM presentan niveles de ajuste marginal comparables o superiores a los obtenidos con técnicas convencionales. (25,29–33,34–37)

En rehabilitaciones de arco completo, la posibilidad de diseñar y fabricar barras y estructuras a partir de modelos digitales bien registrados contribuye a mejorar la pasividad de las uniones, reduciendo tensiones indeseadas sobre los implantes y el hueso. (4,8,25,34–37)

Y así la precisión no depende únicamente de la tecnología, sino también de:

- La calidad del escaneado.
- La correcta alineación de los archivos.
- La fidelidad de la librería de componentes protésicos.
- La calibración de los equipos de fresado o impresión. (25–28,34–37)

Con todo, aun cuando todos estos elementos se controlan de forma coherente, el resultado suele ser más predecible y reproducible que en un flujo completamente analógico.

2.4.2. Control del perfil de emergencia y de los tejidos blandos

Una de las aportaciones más significativas de los sistemas CAD/CAM es la posibilidad de diseñar pilares personalizados que respeten el contorno de los tejidos blandos y favorezcan un perfil de emergencia armonioso. (23,24,29–33)

Cuando se habla de la zona anterior, donde la estética es de un carácter prioritario, el diseño digital viabiliza:

- El adaptar el contorno transmucoso, a la anatomía real y la forma de la encía del paciente.

- Situar el punto de transición del implante–pilar–corona en posiciones que optimicen la estabilidad tisular y disminuyan el riesgo de sombras grisáceas.
- Integrar parámetros tales como el grosor de la mucosa y el biotipo gingival en el propio diseño. (23,24,29–33)

Esto incide no solo en el resultado estético inmediato, sino también en la estabilidad a largo plazo de los márgenes gingivales y del hueso crestral asociado.

2.4.3. Eficiencia del flujo de trabajo y comunicación clínico-laboratorio

El flujo digital basado en CAD/CAM mejora la comunicación entre el clínico y el técnico dental:

- Los archivos digitales pueden enviarse en tiempo real, junto con fotografías intraorales, videos y registros de color.
- El especialista puede visualizar de forma precisa la posición de los implantes, los tejidos blandos y la oclusión, sin depender exclusivamente de modelos físicos.
- Las adaptaciones en el diseño pueden discutirse mediante videoconferencia o comentarios en el propio software. (25–28,34–37)

La mayoría de veces, esto se traduce en menos citas para el paciente y en una reducción de tiempos de laboratorio, especialmente cuando se combinan sistemas de sillón para provisionales y sistemas de laboratorio para definitivos. (25–28,31,34–37)

2.4.4. Personalización, trazabilidad y reproducibilidad

El entorno CAD/CAM facilita la personalización de cada elemento protésico, al tiempo que incrementa la trazabilidad del proceso:

- Cada diseño queda almacenado con fecha, parámetros de material, espesores, contactos, etc.
- Es posible revisar versiones previas, comparar diseños y documentar decisiones clínicas.
- En caso de fractura o pérdida, se puede reproducir la prótesis original a partir del diseño guardado, sin repetir todo el flujo. (25–28,34–37)

Desde una perspectiva de calidad, esto se alinea con estándares de gestión y auditoría, y permite a las clínicas y laboratorios mantener registros digitales completos de la actividad implantoprotésica.

2.5. Limitaciones, desafíos y fuentes de error de los sistemas CAD/CAM

2.5.1. Errores en la adquisición de datos y registro

Aunque los sistemas CAD/CAM ofrecen gran potencial de precisión, existen fuentes de error que pueden comprometer el resultado:

- Escaneos incompletos o con áreas distorsionadas por saliva, movimiento del paciente, reflejos o difícil acceso.
- Posicionamiento incorrecto de scanbodies o uso de componentes incompatibles con la librería del software.
- Errores en el registro y alineación de modelos digitales con datos CBCT. (14,15,25–28,34–37)

En rehabilitaciones extensas sobre implantes múltiples, pequeños errores de milímetros pueden traducirse en estructuras que no asientan pasivamente, obligando a ajustes complejos o incluso a repetir parte del proceso. (34–37)

2.5.2. Limitaciones del software y riesgos de “sobreconfianza digital”

Los softwares CAD implantológicos son herramientas poderosas, pero no infalibles. Entre algunas de las limitaciones podemos encontrar:

- Período de capacitación: el operador, técnico o especialista necesita tiempo para dominar las funciones, zonas de contactos, espesores mínimos y estrategias de diseño.
- Potenciales limitaciones en las librerías (cuando se trabaja en sistemas cerrados) que limitan la selección de componentes.
- Caer en la “sobreconfianza digital”, es decir, asumir que el resultado será automáticamente perfecto por ser digital, sin aplicar juicio clínico crítico. (25–28,34–37)

El clínico debe recordar que el software trabaja con datos y librerías que solo representan la realidad en la medida en que los datos de entrada sean correctos y las librerías estén bien calibradas.

2.5.3. Tolerancias de fabricación y comportamiento de los materiales

Incluso con diseños digitales precisos, la fabricación está sujeta a **tolerancias**:

- En fresado, el diámetro de las fresas limita la fidelidad en zonas muy estrechas o detalles finos.
- En impresión 3D, la resolución de la capa y el comportamiento del material durante el postcurado pueden introducir desviaciones dimensionales.
- Los procesos de sinterización de zirconia o metal pueden generar cambios de volumen que deben compensarse mediante factores de escala previamente calibrados. (29–33,34–37)

Además, el comportamiento de los materiales a largo plazo (fatiga, desgaste, microfracturas) sigue requiriendo seguimiento clínico, sobre todo con materiales y resinas de nueva generación. (29–33,38–40)

2.5.4. Costos, curva de aprendizaje y dependencia tecnológica

La implementación de sistemas CAD/CAM supone una inversión económica considerable en:

- Equipos de escaneado, fresadoras o impresoras.
- Software de diseño y licencias.
- Mantenimiento, calibraciones y renovaciones tecnológicas. (25–28,31,34–37)

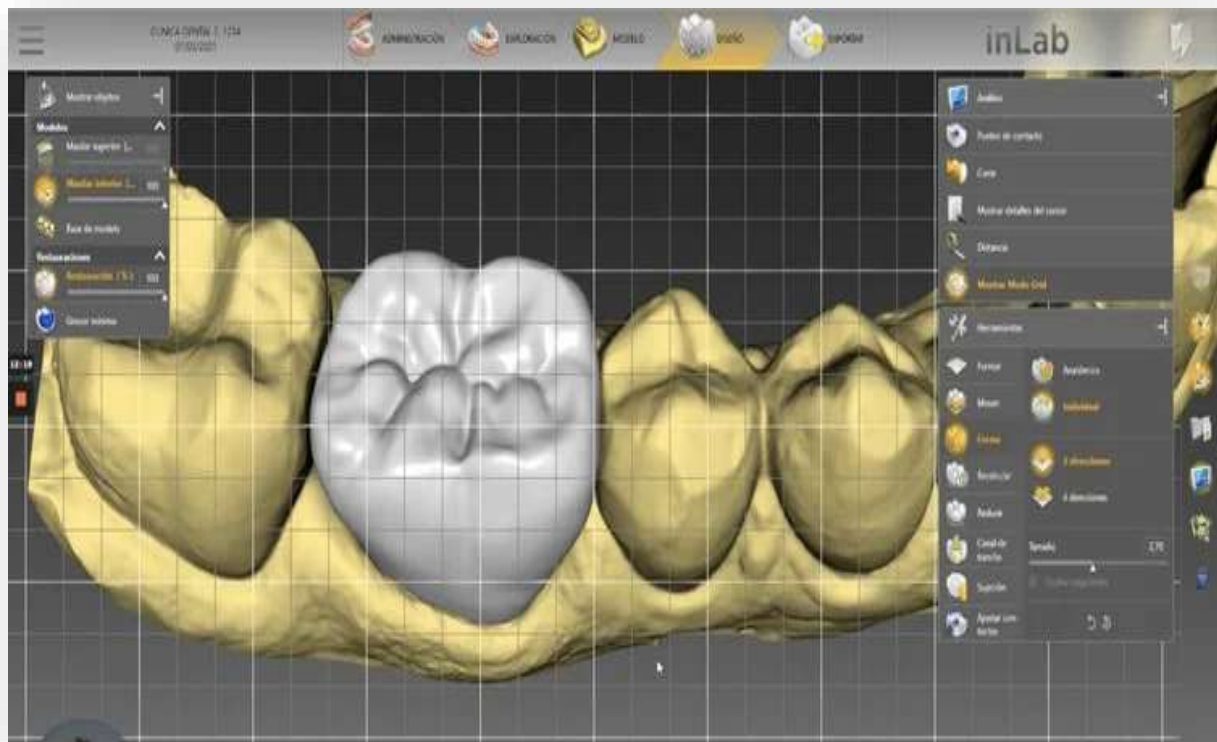
A esto se suma la curva de aprendizaje del equipo clínico y del laboratorio, así como la necesidad de actualizarse periódicamente en nuevas versiones y materiales. Por otro lado, una excesiva dependencia de la tecnología puede ser problemática si se producen fallos de hardware, incompatibilidades de software o discontinuación de determinados sistemas, lo que resalta la importancia de elegir soluciones escalables y evitar, en lo posible, ecosistemas excesivamente cerrados que limiten la flexibilidad futura. (25–28,34–37,38–40)

2.6. Aplicaciones clínicas de los sistemas CAD/CAM en implantología

2.6.1. Rehabilitación unitaria sobre implantes

Las coronas unitarias sobre implantes representan una de las aplicaciones más frecuentes de los sistemas CAD/CAM:

Figura 21. Rehabilitación unitaria sobre implante mediante CAD/CAM



Nota: se muestra una ilustración de una corona implantosoportada diseñada y fabricada digitalmente, optimizando ajuste, oclusión y estética.

- Es posible poder diseñar las coronas atornilladas directamente al implante o cementadas sobre pilares personalizados o prefabricados.
- La opción de ajustar con precisión, los contactos proximales y oclusales en el entorno digital reduce el número de ajustes en la boca.

- En lo que denominamos zona anterior, las cerámicas de alta estética o la zirconia de nueva generación permiten un resultado armónico con los dientes adyacentes. (29–33,38–40)

Los sistemas de sillón (chairside) permiten, además, ofrecer coronas provisionales o incluso definitivas en una sola visita, lo que contribuye a la satisfacción del paciente y a la eficiencia del tratamiento. (31,38–40)

2.6.2. Rehabilitaciones múltiples y de arco completo

Figura 22. Rehabilitaciones múltiples y de arco completo asistidas por CAD/CAM



Nota: La imagen muestra la implementación del diseño y fabricación digital en prótesis extensas implantosoportadas, facilitando la pasividad estructural y la carga inmediata.

En las rehabilitaciones de varios implantes o en arcos completos, el flujo CAD/CAM permite o facilita:

- Diseñar las barras para sobredentaduras, con perfiles optimizados y espacios controlados para sistemas de retención.
- Generar las estructuras de puente de largo alcance, sea en metal, zirconia o materiales híbridos.
- Adaptación a protocolos de carga inmediata, en los que resulta imperativo fabricar prótesis provisionales o definitivas a partir de una planificación previa. (4,8,25,34–37,38–40)

La capacidad de predecir mediante simulación digital la relación entre implantes, estructura y tejidos blandos perfecciona el control de la estética, la fonética y la higiene en prótesis extensas, que históricamente han supuesto un reto mayúsculo tanto para el clínico como para el técnico.

2.6.3. Pilares personalizados y manejo estético en zona anterior

En la región anterior del maxilar, la combinación de implantes y CAD/CAM se orienta a resolver un triple desafío:

- Lograr una emergencia protésica natural que imite la anatomía radicular.
- Mantener o restaurar el volumen de tejidos blandos y el soporte labial.

- Evitar la exposición de componentes metálicos o sombras grisáceas a través de la encía. (23,24,29–33,38–40)

Los pilares personalizados en titanio recubierto, zirconia o materiales híbridos permiten:

- Ajustar el ángulo de emergencia y el margen del pilar al contorno gingival real.
- Situar la línea de terminación subgingival en una posición que facilite higiene y estética.
- Integrar la posición tridimensional del implante, incluso cuando no sea ideal, con un diseño protésico optimizado. (23,24,29–33)

2.6.4. Prótesis provisionales inmediatas y carga inmediata

Figura 23. *Prótesis removible parcial con estructura metálica*



Nota: Representación de una prótesis removible parcial soportada por dientes naturales, compuesta por una estructura metálica, retenedores (ganchos) y base acrílica con dientes artificiales.

Los sistemas CAD/CAM también se han integrado en protocolos de carga inmediata, en los que se coloca una prótesis provisional (a menudo atornillada) el mismo día o en los días posteriores a la cirugía de implantes:

- A partir de la planificación digital previa y del encerado virtual, se pueden diseñar y fabricar prótesis provisionales listas para conectar tras la colocación de los implantes.
- El ajuste final puede requerir modificaciones mínimas si la ejecución quirúrgica respeta la planificación digital.
- Estas prótesis provisionales no solo cumplen funciones estéticas y funcionales, sino que ayudan a modelar los tejidos blandos alrededor de los implantes. (4,8,14,15,34–37).

El uso de CAD/CAM en esta fase permite replantear los protocolos tradicionales, logrando rehabilitaciones más rápidas sin renunciar a la trazabilidad y al control.

2.6.5. Aplicaciones en casos complejos y situaciones especiales

En pacientes con reabsorciones severas, malposiciones previas, secuelas traumáticas o malformaciones, el flujo CAD/CAM facilita:

- La simulación de diferentes escenarios protésicos antes de la cirugía.
- La evaluación de la necesidad de injertos óseos, elevaciones de seno u otras técnicas de aumento.
- El diseño de prótesis que compensen discrepancias en altura, volumen o posición de estructuras remanentes, siempre dentro de límites funcionales y estéticos aceptables. (11–13,14,15,34–37,38–40)

En estos contextos, la implantología digital y el diseño asistido por computadora se convierten en herramientas de planificación estratégica, que permiten integrar la visión del cirujano, del prostodoncista y del técnico de laboratorio en un proyecto coherente antes de intervenir al paciente.

2.7. Perspectivas y tendencias futuras específicas del CAD/CAM en implantología digital

Aunque este capítulo se centra principalmente en el estado actual de los sistemas CAD/CAM, muchas de las tecnologías descritas evolucionan rápidamente. En el contexto de la implantología digital, algunas tendencias específicas relacionadas con CAD/CAM incluyen:

2.7.1. Integración total de datos y ecosistemas interoperables

La tendencia a futuro apunta a ecosistemas donde:

- El CBCT, el escáner intraoral, la planificación quirúrgica y el diseño protésico compartan una plataforma común, reduciendo la necesidad de exportar e importar archivos entre programas.
- Se utilicen estándares abiertos que faciliten la combinación de soluciones de distintos fabricantes sin pérdida de información.
- Se integren, en el mismo entorno, herramientas de análisis oclusal digital, seguimiento a largo plazo y evaluación de resultados. (14,15,17–20,25–30,34–37)

2.7.2. Automatización del diseño protésico mediante inteligencia artificial

La inteligencia artificial aplicada al CAD tiene el potencial de:

- Proponer diseños iniciales de coronas, puentes y pilares a partir de la anatomía del paciente y de bases de datos de formas dentarias.
- Sugerir ajustes oclusales, espesores mínimos y perfiles de emergencia óptimos.
- Detectar automáticamente posibles zonas de riesgo biomecánico o de higiene deficiente en el diseño. (17–19,38–40)

El rol del clínico y del técnico no desaparece, pero se transforma en un papel de supervisión y refinamiento, apoyado en sugerencias automatizadas basadas en grandes volúmenes de datos clínicos.

2.7.3. Nuevos materiales y fabricación híbrida

La evolución de materiales compatibles con CAD/CAM continúa, con:

- Resinas de altísima resistencia y estabilidad dimensional.
- Zirconias multicapa que combinan gradientes de translucidez y resistencia.
- Materiales híbridos cerámica-polímero con propiedades de absorción de fuerzas. (29–33,38–40)

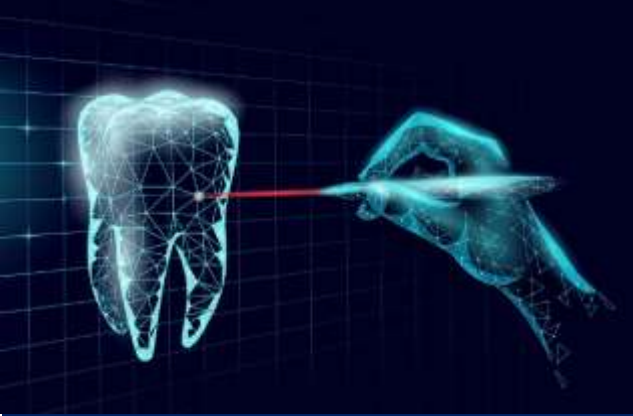
Asimismo, se esperan modelos de fabricación híbrida, donde la combinación de fresado e impresión 3D en un mismo flujo permita aprovechar las ventajas de cada técnica según la indicación, el material y la anatomía. (31–33,38–40).

En este contexto, el uso de nuevos biomateriales y esquemas de fabricación híbridos también afecta la longevidad clínica y la personalización funcional de las rehabilitaciones de implantes, ya que permite la selección de combinaciones de materiales en términos de carga, estética y biocompatibilidad. Por eso se utilizan zirconias multicapa, que optimizan la integración estética en áreas anteriores, y materiales híbridos como el cerámica-polímero pueden permitir una respuesta más mecánica y más "amortiguada" en pacientes con altas demandas oclusales, reduciendo el riesgo de fracturas o fallos por fatiga. Al mismo tiempo, la fabricación híbrida permite el mejor tiempo y precisión: el fresado es mejor para componentes de ajuste crítico, mientras que la impresión 3D es más adecuada para estructuras auxiliares o geometrías más complejas sin comprometer el control clínico del producto final. (29–33,38–40).

2.7.4. Validación clínica, estandarización y calidad digital

Finalmente, a medida que los sistemas CAD/CAM se convierten en estándar de práctica, será cada vez más relevante:

- Establecer protocolos de validación clínica, que comparen resultados digitales con resultados analógicos en términos de precisión, supervivencia y satisfacción del paciente.
- Desarrollar guías de buenas prácticas digitales que aborden desde la calibración de escáneres hasta la verificación de estructuras implantosoportadas.
- Integrar la documentación digital en sistemas de calidad y auditoría, de modo que el flujo de datos se convierta en un soporte objetivo para la mejora continua de la práctica clínica. (25–28,34–37,38–40).



CAPÍTULO 3

CIRUGÍA GUIADA Y PLANIFICACIÓN PREOPERATORIA EN IMPLANTOLOGÍA DIGITAL

3.1. Introducción a la planificación quirúrgica en implantología

La planificación preoperatoria en implantología oral constituye un pilar esencial para alcanzar tratamientos predecibles, seguros y alineados con las expectativas del paciente. Durante décadas, dicha planificación se realizó fundamentalmente con radiografías bidimensionales, modelos de yeso y encerados diagnósticos convencionales. Sin embargo, la complejidad anatómica de los maxilares, la presencia de estructuras nobles (canal mandibular, seno maxilar, fosas nasales) y las crecientes demandas estéticas y funcionales han evidenciado las limitaciones de los métodos analógicos tradicionales. (4,8,11–13,25)

La irrupción de la implantología digital ha supuesto un cambio de paradigma: hoy es posible integrar en un entorno virtual tridimensional la información del hueso (CBCT), de los tejidos blandos y la oclusión (escaneado intraoral o de modelos), e incluso de la prótesis final planificada, de forma que el implante deje de colocarse “donde hay hueso” para situarse “donde la prótesis lo necesita”, respetando al mismo tiempo las condiciones anatómicas y biomecánicas. (11–16,25–30,34)

De esta manera, la cirugía guiada —ya sea mediante férulas estáticas o sistemas de navegación dinámica— se considera la herramienta que permite trasladar al campo operatorio, con un alto grado de precisión, la planificación y modelos realizados en el entorno digital. (14,17–20,34–37) La cirugía guiada no debe entenderse como un reemplazo del conocimiento anatómico, biológico y quirúrgico del clínico o especialista, sino más bien como un recurso que amplifica su capacidad para ejecutar planes complejos con menor margen de error y mayor trazabilidad.

Así, este capítulo abarca de forma estructurada:

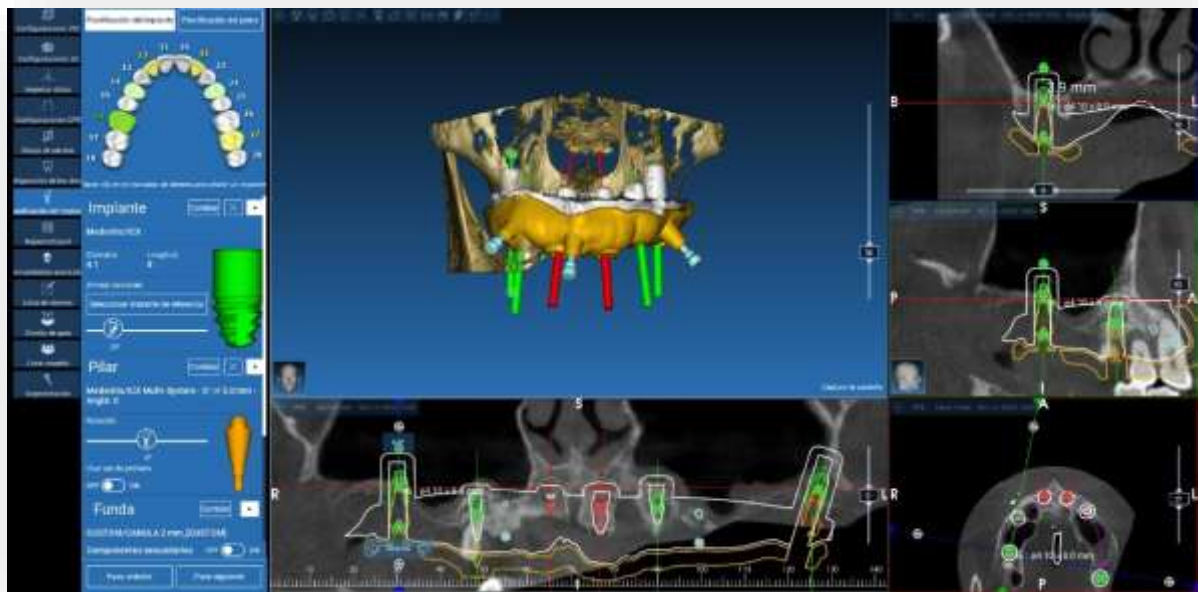
- Los conceptos y fundamentos de la cirugía guiada, diferenciando entre técnicas estáticas y dinámicas.
- La inclusión de imágenes 3D, CBCT y escáneres intraorales en la planificación preoperatoria y en el diseño de guías quirúrgicas.
- Un protocolo clínico integral, ilustrado con casos clínicos comentados, que permita al lector visualizar la aplicación práctica de estos recursos en diversos escenarios implantológicos.

De este modo, se pretende ofrecer una visión articulada de la cirugía guiada como parte de un flujo de trabajo digital completo, estrechamente vinculado a los sistemas CAD/CAM y a la evolución de la implantología contemporánea descritos en el capítulo anterior. (14,15,25–30,34–37)

3.2. Conceptos y fundamentos de la cirugía guiada en implantología

3.2.1. Definición y objetivos de la cirugía guiada.

Figura 24. Planificación implantológica digital tridimensional asistida por software



Nota: Visualización del entorno de planificación implantológica que integra datos de tomografía computarizada de haz cónico (CBCT) y modelos digitales para la colocación virtual de implantes. La imagen muestra la evaluación simultánea de vistas axial, sagital y coronal, así como la simulación protésicamente guiada de implantes, pilares y estructuras de soporte, permitiendo optimizar la posición, angulación y profundidad de los implantes con base en criterios anatómicos, biomecánicos y restauradores.

Se denomina cirugía guiada en implantología al conjunto de procedimientos quirúrgicos en los cuales la posición, angulación y profundidad de los implantes se determinan previamente en un entorno virtual tridimensional, y dicha planificación se traslada al campo operatorio mediante dispositivos que limitan y controlan la trayectoria de las fresas y de los implantes. (14,17–20,34–37)

Podemos considerar que los objetivos principales de la cirugía guiada son:

- Elevar la precisión en la ejecución y colocación de los implantes con relación a la planificación digital.
- Maximizar la seguridad, reduciendo el riesgo de perforaciones corticales indeseadas o daño a estructuras anatómicas críticas.
- Viabilizar abordajes no tan invasivos, con colgajos reducidos o incluso técnicas *flapless* cuando la situación lo permite.
- Contribuir a una implantología protésicamente guiada, en la que la rehabilitación final o provisional se integre desde la fase preoperatoria. (14,17–20,34–37)

Aunque no todos los casos requieren cirugía guiada, su utilización se ha extendido en indicaciones como:

- Regiones anatómicamente comprometidas (maxilares atróficos, proximidad al canal mandibular o al seno maxilar).
- Rehabilitaciones múltiples o de arco completo.
- Protocolos de carga inmediata que exigen una correspondencia muy estrecha entre la posición planificada de los implantes y la prótesis provisoria preconstruida. (4,8,14,34–37)

3.2.2. Cirugía guiada estática

En la cirugía guiada estática, la planificación digital se materializa en una férula quirúrgica rígida, generalmente confeccionada mediante impresión 3D o fresado, que se apoya en dientes, mucosa o hueso, y que contiene cilindros metálicos o plásticos (sleeves) a través de los cuales pasan las fresas y, en muchos sistemas, los propios implantes. (14,15,17–20,34–37). Las características clave de esta modalidad son:

- La guía se diseña y fabrica antes de la cirugía y no puede modificarse intraoperatoriamente sin comprometer la correspondencia con la planificación.
- La precisión depende de múltiples factores: calidad del CBCT, fidelidad del escaneado intraoral o del modelo, exactitud en la fusión de archivos, diseño geométrico de la férula, sistema de anclaje y tolerancias entre fresas y sleeves. (14,15,25–28,34–37)

Existen diferentes tipos de apoyo:

- *Dento-soportadas*, cuando se apoyan principalmente sobre dientes remanentes.
- *Mucoso-soportadas*, típicas en edéntulos totales, en las que la estabilidad depende de la adaptación a la mucosa y, a menudo, de la fijación mediante pines.
- *Osteo-soportadas*, apoyadas directamente sobre el hueso tras levantar un colgajo, generalmente utilizadas en situaciones de elevada reabsorción o en cirugía oncológica y reconstructiva. (34–37)

La cirugía guiada estática es actualmente la modalidad más difundida a nivel clínico, gracias a su relativa accesibilidad tecnológica y a la integración con el flujo CAD/CAM para la confección de férulas y prótesis provisionales. (14,15,25–28,34–37)

3.2.3. Cirugía guiada dinámica y sistemas de navegación

Figura 25. Evaluación tridimensional y mediciones óseas en planificación implantológica



Nota: Imágenes obtenidas a partir de tomografía computarizada de haz cónico (CBCT) integradas en un software de planificación implantológica, que permiten analizar el volumen óseo disponible, la relación del implante con estructuras anatómicas adyacentes y las distancias de seguridad.

La cirugía guiada dinámica se basa en sistemas de navegación en tiempo real, conceptualmente similares a los utilizados en neurocirugía y ortopedia. En lugar de emplear una férula rígida que determine mecánicamente la trayectoria, el cirujano opera libremente, pero asistido por un sistema que muestra en pantalla la posición tridimensional de la fresa o del implante en relación con el volumen CBCT del paciente. (17–20,41–44)

Los componentes habituales de un sistema de navegación incluyen:

- Un sensor de seguimiento (óptico o electromagnético) que localiza en el espacio tanto al paciente como a la pieza de mano.
- Marcadores o fiduciales fijados a referencias anatómicas o a dispositivos rígidos en la boca del paciente.
- Un software de navegación que integra la planificación preoperatoria (realizada sobre el CBCT) y muestra, en tiempo real, la desviación entre la trayectoria prevista y la posición actual del instrumento. (17–20,41–44)

Entre las ventajas de la cirugía guiada dinámica se destacan:

- Posibilidad de realizar ajustes intraoperatorios en función de hallazgos no previstos (calidad ósea, perforaciones, etc.).
- Reducción de la dependencia de férulas voluminosas que pueden interferir con el acceso o con la irrigación.
- Disminuye la dependencia de la estabilidad de la guía en casos con pocos dientes remanentes o mucosa muy compresible. (17–20,41–44)

Sin embargo, estos sistemas requieren:

- Inversión económica elevada.
- Curva de aprendizaje significativa.
- Sincronización adecuada entre el registro inicial, el mantenimiento de la referencia durante la cirugía y la interpretación correcta de la información en pantalla. (17–20,41–44)

3.2.4. Comparación entre cirugía guiada y cirugía convencional libre

La cirugía implantológica tradicional o freehand se basa en la experiencia clínica y en la interpretación directa de la anatomía y de las radiografías por parte del operador. Aunque cirujanos experimentados pueden lograr resultados muy satisfactorios con técnicas libres, la literatura ha documentado desviaciones significativas entre la posición planeada y la posición final de los implantes, especialmente en términos de angulación y longitud efectiva dentro del hueso. (11–13,34–37,41–44)

Diversos estudios comparativos han mostrado que:

- Tanto la cirugía guiada estática como la dinámica tienden a ofrecer menores desviaciones angulares y lineales en comparación con la cirugía libre, en particular en rehabilitaciones múltiples y en regiones con anatomía compleja. (34–37,41–44)
- La cirugía guiada estática presenta una precisión muy alta cuando todos los pasos del flujo digital se ejecutan correctamente; sin embargo, es más vulnerable a errores acumulativos en la fase de adquisición y diseño, al no ser modificable durante la intervención. (34–37)

- La cirugía guiada dinámica permite ajustes intraoperatorios, pero su precisión depende de la estabilidad del sistema de navegación, del registro y del manejo del campo operatorio bajo la guía de la pantalla. (17–20,41–44)

La elección entre una modalidad y otra debe basarse en la complejidad del caso, la disponibilidad tecnológica, la experiencia del cirujano y las expectativas del paciente. (4,8,34–37,41–44)

3.2.5. Indicaciones, contraindicaciones y selección de casos La indicación de cirugía guiada debe realizarse dentro de una visión integral del caso: Indicaciones frecuentes:

- Pacientes edéntulos totales o parciales con rebordes atróficos donde la proximidad a estructuras anatómicas críticas exige una precisión elevada.
- Rehabilitaciones de arco completo con protocolos de carga inmediata, en las que la prótesis provisional se fabrica previamente.
- Casos en los que la estética es fundamental y la posición tridimensional del implante debe ser muy precisa para permitir perfiles de emergencia y líneas de terminación favorables.
- Pacientes con apertura limitada, condiciones anatómicas complejas o necesidad de abordajes *flapless*. (4,8,14,17–20,34–37)

Posibles contraindicaciones relativas:

- Pacientes con imposibilidad de someterse a CBCT por razones médicas o de acceso.
- Cuando hay escasez o mala calidad de datos (CBCT con artefactos, escaneos incompletos) y, por lo tanto, no hay una planificación digital confiable.
- Profesionales novatos en el flujo de trabajo digital o equipos con poca experiencia, y por lo tanto el riesgo de errores por uso incorrecto o mala aplicación de la tecnología. (11–13, 25–28, 34–37).

Por lo tanto, saber cómo seleccionar casos es un factor clave para el éxito de la cirugía guiada: no todos los pacientes se beneficiarán igualmente de esta tecnología y debe justificarse por una mejora real en precisión, seguridad o eficiencia en comparación con una buena técnica a mano alzada. (4,8,34–37,41–44)

3.3. Fundamentos de precisión y seguridad en cirugía guiada

3.3.1. Fuentes de error en el flujo digital y quirúrgico

Figura 26. Rehabilitación protésica implantosoportada en sector anterior



Nota: Imagen clínica de una restauración implantosoportada en la zona anterior maxilar, donde se observa la integración estética de la prótesis con los tejidos blandos periimplantarios.

Aunque la cirugía guiada se presenta a menudo como sinónimo de “alta precisión”, es importante comprender que el flujo digital completo introduce múltiples fuentes de posible error, que pueden sumarse si no se controlan adecuadamente:

1. Errores de adquisición radiológica

- Artefactos metálicos en CBCT (restauraciones, prótesis), distorsiones y ruido.
- Movimiento del paciente durante la exploración.
- Uso de parámetros inadecuados de voxel³⁷ o campo de visión. (11–13,25–28)

2. Errores de escaneo intraoral³⁸ o de modelos

- Regiones no capturadas o “huecos” en la malla digital.
- Distorsiones por saliva, reflejos o tracción excesiva de tejidos blandos.
- Dificultades en registrar trayectos largos en casos de edentulia³⁹ total. (15,16,25–28)

3. Errores en la fusión de archivos (DICOM–STL)

- Alineaciones inexactas por selección incorrecta de puntos de referencia.
- Diferencias entre la posición en que se adquirió el CBCT y la posición del paciente en la boca en el momento del escaneo. (14,15,25–28,34–37)

4. Errores de diseño y fabricación de la guía

- Espesor insuficiente o geometría que compromete la rigidez de la férula.
- Tolerancias excesivas entre los cilindros y las fresas.
- Deformaciones en el proceso de impresión 3D o problemas de postcurado. (25–28,31–33,34–37)

5. Errores intraoperatorios

- Asentamiento incompleto de la guía sobre su apoyo (dentosuportado⁴⁰, mucoso, óseo).
- Movimiento de la férula durante el fresado por falta de fijación.
- Utilización incorrecta de las llaves de fresado o secuencia de brocas. (34–37,41–44)

En la cirugía guiada dinámica, además de los anteriores, pueden añadirse:

- Fallos o imprecisiones en el registro del paciente respecto al CBCT.
- Desplazamiento de los marcadores durante la cirugía.
- Retrasos o errores en la interpretación del feedback en pantalla por parte del cirujano. (17–20,41–44).

Comprender estas fuentes de error es fundamental para diseñar protocolos que las minimicen y para interpretar críticamente los resultados de la cirugía guiada, evitando una visión ingenuamente “determinista” de la tecnología.

3.3.2. Parámetros de desviación y evaluación de la precisión

A menudo comparamos la cirugía guiada y la cirugía a mano alzada y analizamos la desviación lineal y angular entre la posición planificada y la posición lograda:

³⁷ Unidad mínima tridimensional que compone una imagen digital en 3D, equivalente al píxel en imágenes bidimensionales.

³⁸ Procedimiento digital que captura imágenes tridimensionales de dientes y tejidos orales mediante un escáner intraoral.

³⁹ Condición clínica caracterizada por la ausencia parcial o total de dientes naturales.

⁴⁰ Tipo de prótesis o restauración que se apoya y se sostiene sobre dientes naturales del paciente.

- A nivel del cuello del implante (coronal).
- A nivel del ápice.
- Desviación angular entre el eje planificado y el eje real del implante. (34-37, 41-44).

La desviación promedio para la cirugía guiada estática es

- 1-1.5 mm a nivel coronal.
- 1.5-2 mm a nivel apical.
- 3-5° de desviación angular.

Estos valores son clínicamente aceptables en la mayoría de las situaciones, pero también destacan la importancia de los márgenes de seguridad para las estructuras anatómicas críticas, incluso en la cirugía guiada. (34–37,41–44). Para la navegación dinámica, los resultados varían dependiendo del sistema y la experiencia del operador, pero pueden ser comparables a la cirugía guiada estática cuando se siguen protocolos estrictos y se controla la estabilidad del registro. (17–20,41–44).

3.3.3. Seguridad anatómica y márgenes de protección

Dado que la precisión nunca es absoluta, se recomienda mantener distancias de seguridad entre la posición planificada del implante y estructuras como:

- El canal mandibular y sus ramas.
- El seno maxilar y su membrana.
- Las corticales vestibular y lingual en zonas de riesgo de perforación.
- La fosa nasal y el conducto incisivo. (11–13,34–37,41–44)

Las guías clínicas y los autores expertos sugieren márgenes de 1,5–2 mm respecto a estas estructuras, a fin de compensar las posibles desviaciones acumuladas del flujo digital y quirúrgico. (11–13,34–37,41–44)

En la planificación preoperatoria, el clínico debe, por tanto:

- Visualizar en el CBCT la relación entre el implante virtual y los límites anatómicos, aplicando estos márgenes de seguridad.
- Ajustar longitud y diámetro de los implantes de forma que, además de considerar requisitos protésicos y biomecánicos, se reserve un “colchón” de hueso entre el ápice y las estructuras críticas.

3.3.4. Impacto de la cirugía guiada en el trauma quirúrgico y la recuperación

Uno de los argumentos a favor de la cirugía guiada es su contribución a técnicas de mínima invasión. Al disponer de una planificación tridimensional precisa, en muchos casos es posible:

- Reducir el tamaño de los colgajos o incluso realizar enfoques sin colgajos si el grosor del hueso y la forma de la cresta lo permiten.
- Reducir la resección ósea innecesaria.

- Mejorar el tiempo operatorio optimizando la secuencia de perforación y la colocación del implante. (8,9,34–37,41–44) Aunque hay resultados variados en la literatura, en la mayoría de los casos (4,8,34–37,41–44) se logra menos hinchazón y dolor postoperatorio en la cirugía guiada mínimamente invasiva en comparación con los colgajos libres extensos.

- Mayor satisfacción del paciente cuando la cirugía guiada se combina con protocolos de carga inmediata y rehabilitaciones integrales planificadas.

No obstante, el carácter *flapless* debe emplearse con prudencia: la ausencia de visualización directa del hueso puede dificultar la detección de defectos óseos, fenestraciones o dehiscencias, y no es recomendable en casos con rebordes muy irregulares o cuando existe duda sobre la cantidad real de hueso. (8,9,34–37)

3.4. Integración de imágenes 3D, CBCT y escáneres intraorales

3.4.1. Rol del CBCT en la planificación preoperatoria

La **tomografía computarizada de haz cónico (CBCT)** se ha convertido en una herramienta casi indispensable para la planificación avanzada de implantes:

- Permite una visualización volumétrica del hueso maxilar o mandibular, con reconstrucciones multiplanares⁴¹ que muestran espesor, altura y morfología general del reborde.
- Facilita la identificación y el trazado de estructuras anatómicas críticas (canal mandibular, forámenes mentonianos, seno maxilar, fosas nasales, septos, crestas óseas internas).
- Ofrece la posibilidad de medir distancias y ángulos con una precisión superior a la radiología bidimensional convencional. (11–13,25–28,34–37)

En el contexto de la cirugía guiada, el CBCT proporciona el volumen de referencia sobre el cual se planifican virtualmente los implantes. El archivo DICOM resultante se importará posteriormente al software de planificación, donde se combinará con los datos de la superficie intraoral. (11–13,14,15,25–28). Para garantizar resultados fiables, es importante:

- Ajustar el campo de visión (FOV⁴²) al área de interés, evitando exposiciones más amplias de lo necesario.
- Utilizar parámetros de voxel que equilibren resolución y dosis de radiación.
- Asegurar que el paciente se mantenga estable durante la exploración, utilizando guías de mordida o soportes adecuados. (11–13)

3.4.2. Escaneado intraoral y captura de la situación clínica

Los escáneres intraorales complementan la información del CBCT aportando una representación detallada de:

- Dientes remanentes, incluyendo superficies oclusales, contactos y anatomía coronaria.

⁴¹ Capacidad de visualizar imágenes en diferentes planos (axial, sagital y coronal) para un análisis más preciso de las estructuras anatómicas.

⁴² Área anatómica que abarca una imagen radiográfica o tomográfica; puede variar en tamaño según la zona de interés a estudiar.

- Tejidos blandos, especialmente en lo relativo al contorno gingival y al volumen de la mucosa.
- En rehabilitaciones sobre implantes, la posición de estos mediante el uso de scanbodies atornillados. (15,16,25–28)

El escaneado intraoral debe realizarse siguiendo protocolos específicos para cada situación:

- En pacientes parcialmente dentados, se recomienda incluir de forma completa las arcadas involucradas y los registros de oclusión.
- En casos de edentulia total, puede ser necesario combinar escaneos segmentados, prótesis existentes y registros adicionales para obtener un modelo estable y fiable. (15,16,25–28,34–37)

La calidad de este escaneo condiciona la fidelidad del modelo digital y, en consecuencia, la adaptación y el diseño de la guía quirúrgica y de la prótesis futura.

3.4.3. Fusión de archivos DICOM y STL en el software de planificación

El paso clave en la integración de imágenes 3D es la fusión del volumen CBCT (DICOM) con el modelo de superficie obtenido por escaneado intraoral o escáner de mesa (STL). Esta fusión permite:

- Conectar la arquitectura ósea y los huesos con la dentición y los tejidos blandos.
- Al mismo tiempo, visualizar la futura prótesis (dientes virtuales) y el volumen óseo disponible.
- Planificar la colocación de los implantes de manera guiada protésicamente. (14,15,25–28,34–37).

La alineación de DICOM y STL se puede realizar mediante:

- Encontrar los puntos anatómicos (cúspides, bordes incisales, fosas) que son los mismos para ambos conjuntos de datos.
- Algoritmos de registro automatizados basados en el emparejamiento de superficies. Tras la fusión, es esencial comprobar visualmente la exactitud del registro, verificando que las superficies dentarias del CBCT coinciden adecuadamente con las del modelo STL.

Desajustes en esta fase pueden traducirse, posteriormente, en guías quirúrgicas inexactas. (14,15,25–28,34–37)

3.4.4. Verificación de la integridad y calidad de los datos

Antes de comenzar cualquier planificación posterior, es aconsejable asegurarse de que los datos estén en buen estado:

- No hay áreas incompletas o deformadas en el modelo STL, especialmente en las áreas de soporte de la guía.
- Verifique si hay artefactos en el CBCT que puedan confundirse con estructuras anatómicas o afectar la apreciación de la densidad ósea.

- Evalúe la situación clínica real de la posición mandibular (oclusión) tal como se registró en el caso clínico, especialmente al planificar grandes rehabilitaciones. (11–13, 25–28, 34–37). En casos más complicados, algunos autores sugieren que se realice un segundo escaneo CBCT con férulas radiológicas o equipos que puedan registrar a los pacientes. Sin embargo, los métodos de fusión recientes han mejorado la precisión de estos escaneos en muchos casos. (11–13,34–37,41–44)

3.5. Flujo de trabajo para cirugía guiada estática

3.5.1. Planificación protésica inversa

El principio de la planificación protésica inversa establece que el diseño de la prótesis futura debe guiar la posición de los implantes, y no al revés. En el contexto digital, esto se traduce en:

1. Realizar un encerado virtual de la restauración ideal, ya sea a partir de bibliotecas de dientes, copia digital de prótesis existentes o diseño anatómico personalizado.
2. Colocar los dientes virtuales en relación con la estética facial, la línea de la sonrisa, la fonética y la oclusión, integrando la información clínica y fotográfica disponible.
3. Ajustar la posición tridimensional y el eje de los implantes virtuales de modo que la emergencia de los tornillos (en coronas atornilladas) o la preparación de los pilares (en coronas cementadas) sean compatibles con el diseño protésico. (14,15,25–30,34–37)

De este modo, la decisión sobre el número, longitud, diámetro y angulación de los implantes se toma en coherencia con la rehabilitación final prevista, respetando al mismo tiempo las limitaciones anatómicas observadas en el CBCT.

3.5.2. Diseño de la guía quirúrgica

Una vez definida la posición de los implantes, se procede al diseño digital de la guía quirúrgica, considerando:

- Tipo de apoyo (dento-, mucoso- u osteo-soportado) en función del número de dientes remanentes, de la distribución y de la estabilidad esperada.
- Extensión de la férula, que debe ofrecer rigidez suficiente sin interferir con el acceso operatorio ni con la irrigación de las fresas.
- Posición y diámetro de los cilindros o sleeves, así como el uso de llaves de fresado específicas para controlar profundidades y angulaciones. (14,15,25–28,34–37)

En guías mucoso-soportadas, especialmente en pacientes edéntulos totales, suele ser necesaria la fijación con pines al hueso para evitar movimientos durante la osteotomía. El software permite simular también la posición de estos pines para evitar estructuras anatómicas y facilitar el acceso. (34–37) El diseño de la guía debe contemplar también espacios de evacuación para irrigación y para restos de material de fresado, con el fin de reducir el riesgo de sobrecalentamiento óseo.

3.5.3. Fabricación de la férula guiada El archivo digital de la guía se envía al módulo CAM para su fabricación, que normalmente se realiza por:

- Impresión 3D utilizando resinas biocompatibles, seguidas de procesos de lavado y postcurado según las especificaciones del fabricante.

- O, en algunos casos, fresado de bloques de resina rígida. (31–33,34–37)

La precisión dimensional de la férula depende de:

- La calidad y calibración de la impresora o fresadora.
- La orientación de la pieza durante la impresión.
- El cumplimiento riguroso de los pasos de postprocesado (lavado, eliminación de soportes, polimerización final). (31–33,34–37)

Antes de la cirugía, es fundamental realizar una verificación sobre modelos o directamente en boca del paciente para confirmar el asentamiento pasivo y la estabilidad de la férula en la posición prevista.

3.5.4. Ensayo preoperatorio y verificación en modelos

La prueba preoperatoria permite:

- Comprobar el contacto de la férula con los dientes o la mucosa, verificando cualquier interferencia o deformación.
- Comprobar la alineación de las mangas con la posición esperada de los implantes utilizando análogos o pines de prueba.
- Prevenir problemas de acceso (espacio interoclusal, apertura bucal) y planificar la secuencia a realizar (34–37,41–44).

Basado en los procedimientos para la carga inmediata con prótesis preconstruidas, es práctica común simular la rehabilitación en los propios modelos (físicos o virtuales) para que cuando los implantes se inserten de acuerdo con la guía, tanto las conexiones protésicas como la pasividad del conjunto estén bien alineadas con el plan. (4,8,14,34–37).

3.5.5. Procedimiento quirúrgico guiado paso a paso

El día de la cirugía, el procedimiento típico con guía estática incluye:

1. Colocación y fijación de la férula

- Comprobación del asentamiento pasivo.
- En guías mucoso-soportadas u osteo-soportadas, colocación de pines de fijación según el plan.

2. Secuencia de fresado guiado

- Utilización de fresas específicas del sistema, con llaves o manguitos que limitan la profundidad.
- Revisión periódica de la estabilidad de la férula y de la irrigación.

3. Colocación de los implantes

- Ubicación de los implantes a través de la guía, cuando el sistema lo permite, o tras retirar la férula si se ha creado el lecho osteotómico guiado.

- Evaluación del torque de inserción y de la estabilidad primaria.

4. Retirada de la guía y verificación

- Evaluación clínica de la posición y angulación de los implantes.
- Verificación radiográfica intraoperatoria o inmediata cuando se considere necesario.

5. Conexión de pilares o prótesis provisionales

- En protocolos de carga inmediata, montaje de la prótesis preconstruida y ajuste fino en boca.

Este protocolo debe adaptarse a la complejidad del caso, al tipo de prótesis planificada y a las características del paciente, pero ilustra la lógica de la cirugía guiada estática como un proceso fuertemente estandarizado y dependiente de la planificación digital previa. (4,8,14,34–37,41–44)

3.6. Flujos de trabajo para cirugía guiada dinámica

La cirugía guiada dinámica representa una evolución de los conceptos de planificación virtual y transferencia al campo operatorio, sustituyendo la férula rígida por un sistema de navegación en tiempo real que orienta al cirujano mientras trabaja libremente en la cavidad oral. (17–20,41–44)

A diferencia de la guía estática, que materializa físicamente el plan digital en una férula inmóvil, la navegación dinámica convierte el CBCT y la planificación virtual en un “mapa **vivo**”: el sistema muestra en pantalla la ubicación y trayectoria de la fresa o del implante en relación con el volumen óseo, de forma similar a un GPS quirúrgico. (17–20,41–44)

3.6.1. Principios de la navegación quirúrgica dinámica

El fundamento de la navegación dinámica es la correlación espacial entre tres elementos:

- El volumen CBCT del paciente, sobre el que se ha realizado la planificación de implantes.
- La posición real del paciente en el quirófano.
- La posición de la pieza de mano (fresa o portaimplantes) en cada instante.

Mediante un sistema de sensores (ópticos o electromagnéticos), el software calcula y actualiza continuamente la posición del instrumento en relación con el volumen tomográfico, permitiendo al cirujano verificar si la trayectoria que está siguiendo coincide con la planificada. (17–20,41–44). Este enfoque no sustituye la habilidad manual, pero añade una capa de información que ayuda a:

- Mantener la angulación deseada del implante.
- Controlar la profundidad de la osteotomía.
- Respetar márgenes de seguridad respecto a estructuras anatómicas críticas.

3.6.2. Componentes de un sistema de navegación dinámica

Aunque existen diferentes fabricantes, los sistemas de navegación más dinámicos tienen los siguientes componentes:

- Unidad de adquisición y procesamiento: una computadora con software de planificación y navegación que almacena el CBCT, la planificación del implante y realiza cálculos en tiempo real. Sistema de control y monitoreo.
- Óptico (cámaras que detectan marcadores reflectantes o emisores de luz infrarroja).
- Electromagnético (generador de campo y sensores miniaturizados en los propios instrumentos).
- Marcadores o fiduciales: elementos rígidos adheridos al paciente (ya sea en el arco, en la férula radiopaca o directamente en la piel) y al contra-ángulo para que el sistema siempre pueda conocer la posición y orientación espacial de la pieza de mano.
- Monitor o pantalla: donde el CBCT se fusiona con los implantes planificados y, más importante aún, se visualiza en tiempo real la trayectoria del taladro o implante. (17–20,41–44).

Algunos sistemas pueden ayudar a la navegación a un nivel superior a través de pantallas táctiles, pedales y realidad aumentada que proyecta información en el campo de visión del cirujano. Estas aplicaciones se están expandiendo pero comparten la misma lógica básica de superponer el instrumento real en el mapa anatómico digital. (17–20,41–44)

3.6.3. Protocolo de registro y calibración

Para que la navegación sea fiable, se requiere un proceso riguroso de registro y calibración:

1. Registro paciente–CBCT

- El sistema debe saber cómo se relaciona el cráneo real del paciente con el volumen tomográfico.
- Esto se logra mediante:
 - Fiduciales radiopacos visibles en el CBCT y físicamente presentes en una férula o en puntos anatómicos.
 - O mediante registro de superficie, en el que el cirujano “toca” con un puntero ciertas zonas de la arcada que el software reconoce en el CBCT. (17–20,41–44)

2. Calibración de la pieza de mano

- La pieza de mano (fresa) se dota de un marcador, y se realiza un procedimiento de calibración para que el sistema conozca con exactitud la posición de su eje y de su punta activa.
- Cualquier modificación en la longitud del instrumental —un cambio de fresa, por ejemplo— obliga bien a recalibrar el sistema, bien a emplear únicamente fresas que el software ya reconozca y tenga registradas.

3. Verificación del registro

- Previo a iniciar el fresado, se contrasta la exactitud del matching tocando hitos anatómicos inequívocos (cúspides, bordes incisales, crestas óseas) y comprobando en

pantalla que la posición marcada coincide milimétricamente con la esperada en el CBCT.

- Si la diferencia observada resulta significativa, no queda otra que repetir el registro; seguir adelante supondría arrastrar el error a toda la osteotomía. (17–20,41–44)

Este protocolo constituye el corazón de la navegación dinámica. Una calibración deficiente compromete la precisión de todo el procedimiento, por lo que no debe apresurarse ni delegarse sin supervisión.

3.6.4. Secuencia operatoria con navegación dinámica

Una vez realizado el registro, la secuencia quirúrgica con navegación dinámica suele seguir estos pasos:

1. Planificación preoperatoria en el software

Similar a la cirugía guiada estática: se integran CBCT y escaneo de superficie, se planifican implantes protésicamente guiados, se ajustan ejes, diámetros y longitudes, y se definen márgenes de seguridad anatómicos. (14,15,25–30,34–37)

2. Preparación del campo y posicionamiento del paciente

- El paciente se coloca de forma que la línea de visión entre el sistema de seguimiento y los marcadores no se vea interrumpida.
- Se instalan los fiduciales (por ejemplo, una férula rígida con un marcador).

3. Registro y calibración

- Como se ha descrito, se correlaciona el paciente con el CBCT y se calibra la pieza de mano.

4. Fresado de los lechos implantarios

- El cirujano visualiza en pantalla la trayectoria planeada y la posición en tiempo real de la fresa.
- A medida que avanza, ajusta su angulación y profundidad para mantenerse dentro del corredor virtual diseñado.
- El sistema puede mostrar alertas cuando se aproxima a estructuras críticas o se desvía de la planificación. (17–20,41–44)

5. Colocación de los implantes

- Algunos sistemas permiten monitorizar también la inserción de los implantes, mientras que en otros esta fase se realiza guiándose por el lecho ya preparado.
- Se comprueba la estabilidad primaria y se realizan controles radiográficos si se consideran necesarios.

6. Registro final y documentación

- La navegación permite documentar las trayectorias seguidas y las posiciones finales, lo que puede integrarse en la historia clínica digital.

3.6.5. Ventajas y limitaciones específicas de la navegación dinámica

Entre las ventajas de la cirugía guiada dinámica se incluyen:

- Posibilidad de modificar el plan durante la cirugía si se detectan hallazgos inesperados (calidad ósea, defectos, fenestraciones).
- Ausencia de férulas voluminosas, lo que se traduce en un acceso notablemente más holgado en bocas pequeñas o con restricciones de apertura.
- Eliminación de los riesgos inherentes a la mala adaptación —o incluso deformación— de una guía estática convencional. (17–20, 41–44)

No obstante, la técnica arrastra limitaciones que no conviene pasar por alto:

- Exige una inversión inicial en equipos de navegación y, sobre todo, una formación específica que no es opcional.
- El especialista se ve forzado a repartir su atención entre el campo operatorio y la pantalla, lo que implica una curva de adaptación tanto cognitiva como motora; de hecho, al principio se siente como si estuvieras operando «con un ojo en el paciente y el otro en el GPS».
- La precisión dependerá en gran medida de la estabilidad del registro y de la ausencia de movimientos en los marcadores; si estos se desplazan, la navegación pierde fiabilidad. (17–20, 41–44)

En la práctica clínica, la navegación dinámica suele reservarse para casos de mayor complejidad anatómica o para entornos quirúrgicos (hospitalarios o clínicas avanzadas) que ya están familiarizados con tecnologías de navegación en otras especialidades.

3.7. Protocolo clínico integral de planificación preoperatoria

La planificación preoperatoria en implantología digital no se limita al diseño de guías o a la selección de implantes. Es un proceso integral que abarca desde la valoración inicial del paciente hasta la organización del mantenimiento a largo plazo.

3.7.1. Evaluación diagnóstica inicial y selección de pacientes

El punto de partida es una historia clínica exhaustiva, que incluya:

- *Antecedentes médicos generales* (diabetes, enfermedades cardiovasculares, alteraciones hematológicas, tratamientos oncológicos, osteoporosis, inmunosupresión).
- *Medicación habitual* (anticoagulantes, antiagregantes, bifosfonatos, denosumab).
- *Hábitos* (tabaquismo, bruxismo, consumo de alcohol u otras sustancias).

- *Anamnesis odontológica y motivación del paciente, se recaban antecedentes de periodontitis previa, tratamientos restauradores, endodoncias y prótesis existentes, sin olvidar —y esto es clave— la verdadera motivación y expectativas que trae la persona. (4, 8, 21–24)*

Exploración clínica exhaustiva, a partir de ahí, se lleva a cabo una valoración chair-side que abarca:

- *Estado periodontal e higiene oral —punto de partida sine qua non—.*
- *Registro oclusal, relaciones intermaxilares y detección de desgaste severo o facetas de bruxismo que nos alerten de sobrecargas futuras.*
- *Análisis estético facial: línea de la sonrisa, soporte labial y simetría, porque la rehabilitación debe integrarse en el rostro, no solo en el modelo.*
- *Valoración del reborde alveolar en sus tres dimensiones —volumen, arquitectura y calidad de los tejidos blandos—, ya que de ellos dependerá la estabilidad biológica a largo plazo. (8, 9, 23, 24)*

Clasificación de riesgo y toma de decisiones

- *En función de todo lo anterior, se estratifica al paciente en riesgo sistémico y local, de modo que esa categorización acabe dirigiendo:*
- *La propia indicación de implantes (sí/no, cuántos, dónde).*
- *La opción quirúrgica: guiada vs. libre.*
- *El protocolo de carga: inmediata, temprana o diferida. (4,8,21–24,34–37)*

La selección de pacientes para cirugía guiada suele priorizar aquellos casos donde la precisión y la planificación protésica son especialmente críticas, como se discutió anteriormente.

3.7.2. Integración multidisciplinar en la planificación digital

En muchos casos, la planificación implantológica requiere la participación coordinada de varios especialistas:

- **Periodoncia:** evaluación de salud gingival y necesidad de tratamientos previos de control de placa, raspado y alisado radicular o cirugía periodontal.
- **Cirugía oral y maxilofacial:** en casos de atrofas severas, elevaciones de seno, injertos óseos complejos o reconstrucciones segmentarias.
- **Ortodoncia:** cuando se requieren movimientos dentarios previos para crear espacios o mejorar relaciones oclusales.
- **Rehabilitación oral o prostodoncia:** definición del plan protésico global y de la secuencia restauradora. (4,8,14,34–37)

La implantología digital facilita esta integración al proporcionar un entorno visual común (software de planificación y modelos digitales) en el que todos los profesionales pueden:

- Visualizar el caso desde su disciplina.
- Proponer modificaciones.
- Llegar a un consenso sobre número, posición y angulación de implantes, así como sobre el diseño de la prótesis futura.

En escenarios avanzados, esta colaboración puede realizarse mediante reuniones de planificación virtual o teleconferencias, compartiendo la pantalla del software y registrando las decisiones en la historia clínica.

3.7.3. Consentimiento informado en implantología guiada

La implantología, particularmente cuando incluye ciertas tecnologías como CBCT, cirugía guiada, navegación dinámica y materiales avanzados, exige un consentimiento informado robusto. Esto es lo que el paciente ha de conocer y reflexionar, y que a su vez el especialista debe explicarle con claridad.

Las ventajas y oportunidades de la cirugía guiada son principalmente una mayor precisión tridimensional, potencialmente una cirugía menos invasiva y una integración más estrecha y predecible con la prótesis definitiva.

A pesar de la planificación digital, no existe una precisión absoluta ni una ausencia total de riesgos, y el margen de error siempre está presente, aunque sea menor, y esa es una de las principales limitaciones. Enseñe al paciente sobre las alternativas de tratamiento, incluyendo la cirugía convencional gratuita, otras opciones protésicas (sobredentaduras, puentes fijos sobre dientes, etc.), o incluso intervenciones conservadoras/no intervencionistas. Aclare los riesgos específicos de la implantología: infecciones, pérdida de implantes, lesión nerviosa, exposición sinusal, fallo protésico, etc. (4, 8, 11-13, 34-37, 41-44). Un consentimiento ético y legal sólido también debe incluir:

- CBCT (incluyendo el principio de justificación y optimización)
- Navegación dinámica o asistencia robótica - el apoyo del cirujano. La implantología guiada no solo se basa en recursos tecnológicos, sino también en una comunicación transparente que permite alinear las expectativas del paciente con los resultados reales de la terapia.

3.7.4. Planificación del mantenimiento desde la fase preoperatoria

Todo lo que abarca la planificación previa a la operación debe contemplar no sólo la colocación de implantes y prótesis, sino también el mantenimiento a largo plazo:

- Identificar los posibles tipos de riesgo periodontal y periimplantario desde el inicio, para establecer intervalos de mantenimiento personalizados (por ejemplo, cada 3, 4 o 6 meses). (21-24)
- Diseñar las prótesis pensando en facilitar superficies pulibles y accesibles a la higiene, lo que condiciona el contorno de pilares, la altura de los pónicos y la longitud de los cantiléver.
- Informar a detalle al paciente de la necesidad de cuidados específicos en zonas con restauraciones extensas, biotipos finos o antecedentes de periodontitis —pacientes que, por definición, parten con una susceptibilidad mayor—. (21-24, 29-33)

La cirugía guiada y la planificación digital, al permitirnos prever con mucha antelación la morfología exacta de la prótesis, nos brindan una ventana única para integrar criterios de mantenibilidad en el

propio diseño; de este modo, evitamos restauraciones con geometrías inaccesibles al cepillo o al hilo que, a la postre, acaban favoreciendo la aparición de mucositis y periimplantitis.

3.8. Casos clínicos y aplicación práctica de la cirugía guiada

A continuación, se presentan varios escenarios clínicos ilustrativos que integran los conceptos de planificación preoperatoria y cirugía guiada desarrollados a lo largo del capítulo.

3.8.1. Caso 1: Edentulismo parcial posterior maxilar con seno neumatizado

Situación inicial: Paciente de mediana edad, parcialmente dentado en el maxilar superior, con ausencia de primeros y segundos molares y neumatización del seno maxilar, evidenciada en la radiografía panorámica. Refiere dificultad masticatoria y deseo de una rehabilitación fija.

Planificación diagnóstica: Se realiza exploración clínica, evaluación periodontal y CBCT de la región posterior. El estudio tomográfico muestra altura ósea residual limitada entre la cresta alveolar y el piso sinusal. (11–13). Se decide un plan de tratamiento que incluye:

- Elevación de seno maxilar interna y colocación de implantes simultáneamente, si la altura residual lo permite.
- Uso de cirugía guiada estática dentosoportada para optimizar la posición tridimensional de los implantes en relación con la futura prótesis. (11–13,34–37)

Flujo digital

Arrancamos con el escaneo intraoral de la arcada superior y el registro de oclusión.

A continuación, fusionamos el STL (modelo de superficie) con el DICOM del CBCT dentro del software de planificación.

Seguimos con el encerado virtual de la prótesis —coronas molares— para definir la posición ideal de oclusión y contactos.

Y concluimos la planificación colocando los implantes virtuales con longitud y diámetro adaptados a la altura ósea disponible y al volumen del seno después de la elevación programada. Diseño y fabricación de la guía. Se crea una férula soportada por dientes con manguitos que guían las fresas en el eje planeado; se imprime en resina biocompatible y se prueba primero en modelos y luego en la boca del paciente bajo anestesia local:

- Se coloca la férula y se verifica su estabilidad sobre los dientes restantes.
- Se lleva a cabo la secuencia de perforación y se prepara el lecho óseo y se crea simultáneamente la ventana de acceso al seno.
- La membrana sinusal se eleva de manera atraumática y se coloca el material de relleno en la cavidad.
- Los implantes se insertan a través de la guía (o se retiran, dependiendo del sistema utilizado) para asegurar que el torque de inserción sea suficiente. (11–13, 34–37)

Rehabilitación protésica

Una vez finalizado el periodo de osteointegración, se capturan nuevos registros digitales para diseñar coronas atornilladas sobre implantes mediante CAD/CAM, ajustando contactos y oclusión directamente en el entorno virtual.

Este caso ilustra cómo la cirugía guiada contribuye a combinar procedimientos regenerativos (elevación de seno) con una posición implantaria fuertemente condicionada por la prótesis futura, en un entorno anatómicamente complejo.

3.8.2. Caso 2: Edentulismo total mandibular con guía mucoso-soportada y carga inmediata

Primer diagnóstico: Paciente mandibular completamente edéntulo con una prótesis completa inestable y dificultad para masticar y hablar en público. El paciente exige una solución fija o muy estable. Se realiza un CBCT para ver el reborde restante en la ubicación del canal mandibular, la altura disponible y la posición del canal mandibular. Se encontró que el reborde en la región interforaminal estaba relativamente preservado. (11-13) Elegimos colocar cuatro implantes en la región mandibular anterior y luego unirlos a una prótesis híbrida retenida por tornillos. También intentaremos cargar tan pronto como la estabilidad primaria lo permita. (4,8,34-37)

Flujo de trabajo digital:

1. Escaneo intraoral de la mucosa mandibular con la prótesis actual rebasada y adaptada o escaneo de la misma en un escáner de laboratorio.
2. Fusión del modelo STL con el CBCT con la prótesis como referencia
3. Encerado virtual de la prótesis híbrida final respetando la dimensión vertical, posición labial y estética facial
4. Planificación de la colocación de los implantes interforaminales según la prótesis virtual.
5. Guía soportada en mucosa: Se diseña y se imprime en 3D una guía soportada en la mucosa, que se basa en la base de la prótesis y se fija con pines óseos, y se verifica su adaptación en un modelo impreso del reborde mandibular.
6. Evaluación de la seguridad del implante con anestesia local y sedación consciente
7. La guía se coloca en la mandíbula edéntula y se colocan los pines según el plan.
8. La perforación se realiza a través de las mangas y se realiza irrigación frecuentemente.
9. Se registra el torque de implantación y cuando todos los implantes están posicionados, (es decir, ≥ 35 Ncm) se realiza la carga inmediata. (4, 8, 34–37) En la misma sesión se adapta una prótesis provisional retenida por tornillos CAD/CAM con poco cambio en la boca.

Después de la fase de maduración ósea y tisular, se diseña y fabrica la prótesis final con la misma posición y forma que la provisional. Este caso ilustra la capacidad de la cirugía guiada para integrar prótesis inmediatas, estabilidad primaria y precisión anatómica en un protocolo de rehabilitación rápida para pacientes edéntulos.

3.8.3. Caso 3: Incisivo central superior en zona estética con provisionalización inmediata

Situación inicial: Paciente joven pierde un incisivo central superior por fractura radicular o fracaso endodóntico. Presenta alta demanda estética por su vida social y profesional.

Planificación diagnóstica: Se realiza CBCT localizado del sector anterior, evaluando la tabla vestibular, la altura ósea y la relación con estructuras nasales. Paralelamente se efectúa escaneo intraoral y análisis fotográfico de la sonrisa. (11–13,23,24)

El objetivo es realizar una extracción atraumática⁴³, colocación de un implante inmediato en alveolo y provisionalización inmediata atornillada en zona estética, preservando volumen de tejidos blandos y papilas. (23,24,29–33)

Flujo digital

1. Encerado virtual de la corona definitiva en el software, tomando como referencia el incisivo contralateral y la línea de la sonrisa.
2. Planificación del implante ligeramente palatinizado⁴⁴ respecto al eje de la corona, para preservar la tabla vestibular.
3. Diseño de una guía dentosoportada⁴⁵ que controle la angulación y profundidad del implante en el alveolo.

Cirugía guiada y provisionalización

Se realiza la extracción con instrumental mínimamente invasivo, preservando al máximo las paredes alveolares.

- Se coloca la guía y se ejecuta el fresado siguiendo la planificación.
- Se inserta el implante y se verifica una estabilidad primaria suficiente.
- A partir del diseño previo, se fabrica mediante CAD/CAM una corona provisional atornillada, que se conecta en la misma sesión, ajustando con mimo la oclusión y evitando contactos excéntricos. (23, 24, 29–33)

La prótesis provisional se concibe para modelar el contorno gingival y las papilas; tras la osteointegración, se escanea la situación final de los tejidos blandos y se fabrica la corona definitiva.

Este caso ejemplifica, en definitiva, la aplicación de la cirugía guiada como herramienta para controlar variables críticas en zona altamente estética, integrando la rehabilitación inmediata y la gestión precisa de los tejidos blandos.

3.8.4. Caso 4: Navegación dinámica en mandíbula posterior cercana al canal mandibular

Situación inicial: Paciente parcial edéntulo mandibular con ausencia de premolares y molares, reborde reabsorbido y proximidad del canal mandibular, evidenciada en CBCT. La anatomía del

⁴³ Técnica de extracción dental que minimiza el daño al tejido óseo y a las encías, promoviendo una mejor cicatrización y facilitando la colocación de implantes.

⁴⁴ Se refiere a una superficie o estructura que está relacionada con el paladar, especialmente en prótesis o en los dientes.

⁴⁵ Dispositivo utilizado en cirugía dental que se coloca sobre los dientes existentes para guiar la colocación precisa de implantes o prótesis.

reborde muestra irregularidades que dificultan la valoración únicamente con radiografía panorámica. (11–13)

Motivo para elegir navegación dinámica: La complejidad anatómica y la necesidad de adaptar el plan intraoperatoriamente según la calidad ósea detectada hacen que la clínica opte por un sistema de navegación dinámica en lugar de una guía estática. (17–20,41–44)

Flujo de planificación

Se integra el CBCT en el software de navegación y planificación de implantes, respetando márgenes de seguridad de 2 mm respecto al canal mandibular.

Se genera un modelo digital a partir del escaneo intraoral, útil para valorar la oclusión y el futuro diseño de coronas.

Se definen los puntos de registro en la arcada para el sistema de navegación.

Registro y cirugía

En quirófano:

- Se instalan marcadores en una férula rígida fijada a dientes remanentes.
- Se ejecuta el registro paciente–CBCT mediante puntero, tocando varias cúspides y puntos anatómicos.
- Se calibra la pieza de mano y se verifica la exactitud del registro.
- Durante el fresado, el cirujano controla en tiempo real la posición de la fresa frente al canal mandibular, ajustando la angulación cuando detecta variaciones en la resistencia ósea. (17–20, 41–44)

Una vez completados los lechos, se insertan los implantes y se comprueba su integración dentro del corredor planificado tanto con el propio sistema de navegación como con radiografías de control.

En definitiva, la navegación dinámica aporta aquí una seguridad anatómica extra en un entorno de alto riesgo de lesión del nervio alveolar inferior, sin necesidad de una férula física que podría verse comprometida por la irregularidad del reborde y las limitaciones de acceso.

3.9. Perspectivas futuras de la cirugía guiada y la planificación preoperatoria digital

La cirugía guiada y la planificación preoperatoria digital se encuentran en constante evolución, impulsadas por avances en hardware, software y ciencia de materiales.

3.9.1. Planificación asistida por inteligencia artificial

La inteligencia artificial (IA) tiene el potencial de transformar la planificación implantológica, haciendo evolucionar los sistemas —donde el clínico toma casi todas las decisiones de forma manual— hacia entornos en los que el software:

- Identifica automáticamente estructuras anatómicas en el CBCT (canal mandibular, piso sinusal, fosas nasales).
- Propone posiciones iniciales de implantes basadas en patrones anatómicos, oclusales y estéticos, aprendidos a partir de grandes bases de datos.

- Sugiere longitudes, diámetros y angulaciones de implantes que cumplan a la vez criterios anatómicos, protésicos y biomecánicos. (17–19, 38–40)

El papel del especialista pasaría a ser el de un validador experto, que ajusta y acepta o modifica las propuestas del sistema. Este tipo de interacción puede agilizar la planificación y reducir la variabilidad, siempre que se mantenga un criterio crítico y se comprendan las limitaciones de los algoritmos.

3.9.2. Integración con robótica y realidad aumentada La combinación de cirugía guiada con robótica y realidad aumentada abre líneas de desarrollo especialmente prometedoras:

- Los sistemas robóticos pueden ejecutar movimientos de fresado e inserción de implantes con una precisión lineal y angular muy elevada, siguiendo el plan digital bajo supervisión del cirujano. (20,41–44)
- La realidad aumentada podría proyectar, en el campo de visión del operador (por ejemplo, mediante gafas específicas), la información de la planificación y la posición de las estructuras críticas, evitando que tenga que desviar constantemente la mirada hacia una pantalla. (17–20,41–44)

Estos enfoques, aún en fases de expansión y validación clínica, apuntan a un escenario en el que la interfaz entre el mundo físico (paciente, hueso, instrumentos) y el mundo digital (CBCT, modelos, IA) será cada vez más fluida e inmediata.

Además, la integración de robótica y realidad aumentada podría consolidar un nuevo estándar de control intraoperatorio, al permitir la verificación continua de la trayectoria planificada frente a la ejecución real, con ajustes inmediatos ante micro desviaciones derivadas de la estabilidad del apoyo, la resistencia ósea o variaciones del acceso quirúrgico. Esta convergencia tecnológica es de gran beneficio en casos complejos (especialmente en la parte posterior, cerca del canal mandibular, el seno maxilar o crestas atróficas) donde milímetros y grados pueden determinar el pronóstico. Además, la realidad aumentada puede mejorar la enseñanza y el aprendizaje al proporcionar contexto y estandarización en la ejecución, y la robótica puede ayudar en auditorías clínicas y mejora continua basada en datos. Pero requiere una interoperabilidad robusta entre hardware y software, una calibración rigurosa y responsabilidad profesional para establecerse, con el cirujano tomando las decisiones y liderando el proceso (17–20,41–44).

3.9.3. Estandarización de flujos de trabajo y calidad en cirugía guiada

A medida que la cirugía guiada se generaliza, se hace necesario:

- Desarrollar protocolos estandarizados que fijen criterios de calidad en la adquisición de CBCT, escaneos, fusión de archivos, diseño de guías y verificación intraoperatoria.
- Establecer indicadores de resultado específicos para procedimientos guiados: precisión angular y lineal, tasa de complicaciones anatómicas, éxito a medio y largo plazo y satisfacción del paciente.

Habría que consolidar todo lo que es documentación digital (planificación, guías utilizadas, registros de navegación) en sistemas de gestión y auditoría para que el éxito y la trazabilidad de cada caso puedan evaluarse retrospectivamente. (25–28, 34–37, 38–40) El futuro de la implantología

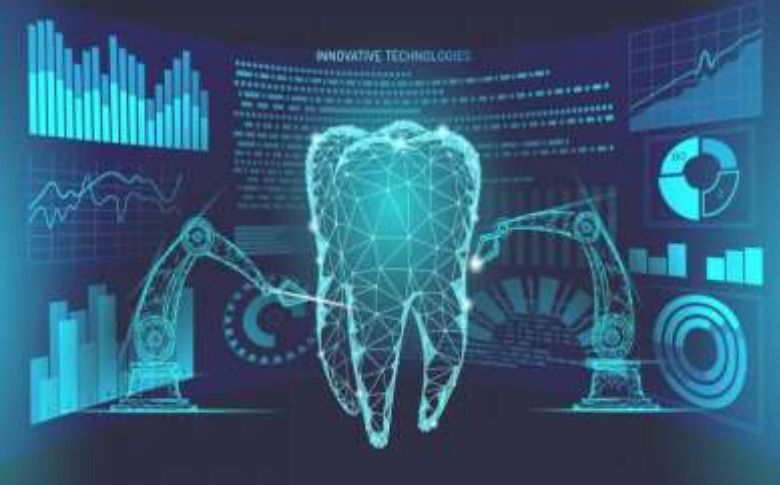
será mucho más solo tecnología: será la integración de la tecnología con marcos de calidad y seguridad clínica con un enfoque basado en la evidencia y educación profesional continua. Y para establecer un estándar de calidad y seguridad que sea sostenible, todo el proceso de casos guiados, desde la indicación hasta el seguimiento, debe considerarse en un proceso de gestión de riesgos y mejora continua.

3.9.4. Formación y competencias digitales del implantólogo

Finalmente, el uso a gran escala de la cirugía guiada en el campo de la formación presenta desafíos:

- Los programas de posgrado y educación continua deben tener conocimientos sobre interpretación de CBCT, gestión de software, CAD/CAM, impresión 3D, navegación y principios de IA.
- Se necesitará una pedagogía más progresiva que esté arraigada en habilidades biológicas y mecánicas que se han explicado en capítulos anteriores y que tenga las habilidades digitales para

utilizarlas de manera crítica y segura. (4, 8, 11–16, 25–30, 34–37).



CAPÍTULO 4

SOFTWARE Y FLUJO DE TRABAJO DIGITAL EN IMPLANTOLOGÍA

4.1. Introducción al ecosistema digital en implantología

La implantología oral contemporánea se apoya cada vez más en un ecosistema digital complejo, en el que convergen imágenes tridimensionales, modelos virtuales, herramientas de planificación, módulos de diseño protésico y sistemas de fabricación computarizada. Todo este entramado se articula a través de distintos tipos de software que permiten capturar, procesar, analizar y transformar la información clínica en decisiones terapéuticas y en dispositivos físicos como guías quirúrgicas y prótesis implantosoportadas. (14,15,25–30,34–37)

La transición desde un paradigma analógico —basado en modelos de yeso, radiografías bidimensionales y encerados manuales— hacia un paradigma digital supone un cambio profundo en la forma de pensar y de organizar el tratamiento:

- El diagnóstico se realiza sobre volúmenes CBCT y modelos intraorales digitales.
- La planificación quirúrgica se lleva a cabo en entornos tridimensionales que integran hueso, dientes y prótesis simuladas.
- El diseño protésico se realiza mediante CAD (Computer-Aided Design), y la fabricación mediante CAM (Computer-Aided Manufacturing), ya sea por fresado o impresión 3D.
- La comunicación con el laboratorio y el archivo de la información se realizan en plataformas digitales, con diferentes grados de integración. (25–30,31–33,38–40)

En este contexto, el software cumple funciones que van más allá del mero cálculo geométrico:

- Estructura el flujo de trabajo desde la primera imagen diagnóstica hasta la prótesis final.
- Condiciona qué datos se consideran relevantes y cómo se visualizan.
- Impone determinadas lógicas de decisión (por ejemplo, protocolos de cirugía guiada, opciones de diseño protésico).
- Facilita u obstaculiza la interoperabilidad entre distintos dispositivos (CBCT, escáneres, fresadoras, impresoras). (25–30,34–37)

Comprender la naturaleza, capacidades y limitaciones del software se convierte, por tanto, en un componente esencial de la competencia profesional del implantólogo moderno. Este capítulo analiza, de manera teórica y sistemática, los principales tipos de software implicados en la implantología digital, sus interrelaciones y su papel en la construcción de flujos de trabajo eficientes, seguros y reproducibles.

4.2. Tipología del software en implantología digital

Aunque los productos comerciales son numerosos y heterogéneos, es posible agrupar el software utilizado en implantología digital en varias categorías funcionales, lo que ayuda a entender mejor su rol dentro del flujo clínico.

4.2.1. Software de imagenología y planificación implantológica 3D

Este primer grupo integra los programas cuya función principal es:

- Importar y visualizar volúmenes CBCT (archivos DICOM).
- Explorar la anatomía en cortes multiplanares y vistas tridimensionales.
- Identificar estructuras anatómicas relevantes (senos maxilares, canal mandibular, cavidad nasal, raíces dentarias).
- Integrar modelos de superficie (archivos STL/PLY) procedentes de escáneres intraorales o de laboratorio.
- Posicionar implantes virtuales según librerías asociadas a diferentes sistemas.
- Diseñar o preparar la información necesaria para fabricar guías quirúrgicas estáticas o exportar los datos a sistemas de navegación dinámica. (11–16, 14, 15, 25–30, 34–37, 41–44)

En esta categoría se ubican los softwares de planificación implantológica 3D, que constituyen el núcleo duro del flujo digital, ya que hacen posible la planificación protésicamente guiada y la cirugía guiada.

4.2.2. Software CAD protésico orientado a implantes

El segundo grupo lo constituyen los sistemas CAD protésicos que permiten:

- Diseñar coronas unitarias y puentes sobre implantes.
- Modelar pilares personalizados anatómicos.
- Crear barras, estructuras metálicas y prótesis híbridas.
- Controlar contactos oclusales y proximales, perfiles de emergencia y espesores mínimos de material. (25–30, 29–33, 38–40)

Estos programas operan sobre modelos digitales que incluyen la posición tridimensional de los implantes y la anatomía del paciente. A menudo integran librerías específicas de implantes y componentes protésicos, lo que permite reproducir con precisión las conexiones implantarias reales.

4.2.3. Software CAM y utilidades para fabricación

Los módulos CAM (Computer-Aided Manufacturing) tienen la función de traducir el diseño digital en instrucciones de fabricación para máquinas físicas:

- Cálculo de trayectorias de fresado, selección de herramientas, velocidades y profundidades de corte.

- Preparación de archivos para impresión 3D (orientación del objeto, generación de soportes, configuración de parámetros de exposición y capas).
- Optimización de la utilización de discos o bloques de material mediante algoritmos de “anidado” (*nesting*). (25–30,31–33)

Aunque en muchos sistemas CAD y CAM se integran en una misma plataforma, teóricamente cumplen funciones distintas: el CAD define la geometría; el CAM organiza el proceso de fabricación.

4.2.4. Software de gestión de pacientes, imagen y comunicación

Un cuarto grupo, más transversal, está constituido por sistemas de:

- Gestión clínica (agenda, historia, facturación, consentimientos).
- Gestión de imágenes (radiografías, CBCT, fotos, modelos digitales).
- Comunicación clínica–laboratorio, que permiten adjuntar archivos 3D, notas y fotografías en una misma plataforma. (25–28,34–37)

Estos programas no son específicos de implantología, pero son fundamentales para organizar el gran volumen de información generado por los procesos digitales implantológicos.

4.2.5. Módulos especializados de análisis y simulación

Pueden existir, además, módulos específicos integrados o independientes orientados a:

- Análisis oclusal dinámico en articuladores virtuales.
- Análisis estético facial y de sonrisa.
- Evaluación de riesgo biomecánico mediante métodos numéricos (por ejemplo, elementos finitos).
- Simulación de cambios de posición de dientes o de prótesis en entornos virtuales. (23,24,29–33,38–40)

Aunque su utilización todavía no es universal, representan una evolución hacia una implantología apoyada en herramientas de simulación avanzada.

4.3. Arquitectura de sistemas e interoperabilidad en el entorno digital implantológico

Además de las funciones concretas de cada programa, es importante analizar cómo se relacionan entre sí desde el punto de vista de la arquitectura de sistemas y la interoperabilidad. Estas dimensiones determinan la facilidad con la que puede fluir la información entre los distintos eslabones del proceso.

4.3.1. Sistemas cerrados y sistemas abiertos

En el ámbito odontológico coexisten dos grandes filosofías de diseño:

- **Sistemas cerrados:**

- Un único fabricante proporciona el escáner intraoral, el software de planificación, el CAD protésico e incluso la fresadora o impresora.
- El intercambio de información se da a través de formatos propietarios.
- La integración fluye de manera correcta dentro del ecosistema, aunque la flexibilidad para incorporar componentes externos permanece limitada.

- **Sistemas abiertos:**

- Se emplean dispositivos de proveedores diferentes (CBCT de un fabricante, escáner de otro, software de un tercero, fresadora de un cuarto).
- La comunicación se apoya en formatos estándar (DICOM para CBCT, STL/PLY/OBJ para modelos 3D).
- Se gana flexibilidad y libertad de elección, a costa de que el usuario debe comprender mejor los flujos de archivo y la compatibilidad entre soluciones. (25–28,34–37)

En la práctica, muchos centros adoptan soluciones híbridas, con algunos componentes fuertemente integrados y otros más abiertos. La elección depende de factores como el presupuesto, el tipo de casos, la experiencia del equipo y la filosofía de trabajo.

4.3.2. Arquitecturas locales, de servidor y en la nube

Desde el punto de vista de la infraestructura informática, pueden distinguirse:

- **Instalaciones locales:**

- El software se ejecuta en ordenadores de la clínica y los datos se almacenan en discos internos o en servidores locales.
- Tienes control total sobre el hardware, pero tú te encargas de backups, actualizaciones y seguridad.
- Arquitectura cliente-servidor local: varios puestos tiran de un servidor central en la misma red; así varios operadores comparten la misma base de imágenes y modelos.
- Sistemas en la nube: software y datos están en servidores remotos del proveedor; accedes desde cualquier sitio y olvidas actualizaciones, aunque dependes de buena conexión y debes blindar la privacidad. (25–28, 38–40)

La implantología digital funciona en cualquiera de las tres, pero con CBCT de alta resolución y modelos pesados, el flujo solo va fluido si la red y el procesamiento están a la altura.

4.3.3. Formatos de archivo y estándares de intercambio

La interoperabilidad práctica se basa en el uso de unos pocos formatos de archivo estándar:

- **DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine):**

- Formato estándar en medicina para imágenes radiológicas, incluyendo CBCT.

- Almacena tanto los datos de voxeles como la información del paciente y los parámetros de adquisición. (11–13,25–28)
- **STL (Standard Tessellation Language):**
 - Describe superficies mediante mallas triangulares.
 - Es el formato más común para modelos generados por escáneres intraorales y de laboratorio.
- **PLY y OBJ:**
 - Permiten, además de la geometría, almacenar color y texturas, lo que mejora la visualización de superficies dentarias y gingivales.
- **Formatos propietarios de proyectos:**

Cada aplicación suele generar sus propios archivos, que almacenan la totalidad del proyecto (posiciones de implantes, parámetros de guía, historial de modificaciones).

La secuencia digital implantológica requiere que el clínico comprenda, al menos a nivel operativo, cómo se generan, exportan e importan estos archivos, y cuáles son sus limitaciones (por ejemplo, STL no almacena información de densidad ósea, solo de superficie). (25–30,31–33,34–37)

4.3.4. Integración entre módulos de planificación, CAD y CAM En la implantología digital madura, existe una **cadena de integración** que conecta:

1. Software de planificación implantológica (CBCT + STL).
2. Software CAD protésico.
3. Módulos CAM y máquinas de producción.

Esta integración puede darse de varias formas:

- Mediante exportación directa desde el programa de planificación al CAD (por ejemplo, posición de implantes y diseño provisional).
- A través de archivos STL que incorporan cilindros o marcadores que representan la plataforma de los implantes.
- Mediante enlaces específicos entre software de planificación y plataformas de fabricación de guías.

La calidad de esta integración condiciona la coherencia geométrica entre lo que se planifica, lo que se diseña y lo que finalmente se fabrica. Desajustes en cualquiera de estos pasos pueden traducirse en discrepancias angulares o lineales que afecten a la cirugía o al ajuste protésico. (25–30,31–33,34–37)

4.4. Software de planificación implantológica: fundamentos teóricos El software de planificación implantológica 3D constituye el componente central de la implantología digital, ya que enlaza el diagnóstico radiológico con la toma de decisiones quirúrgicas y protésicas.

4.4.1. Importación y visualización de CBCT

El proceso se inicia con la importación del examen CBCT en formato DICOM. El software debe ser capaz de:

- Reconstruir el volumen tridimensional a partir de los cortes axiales.
- Mostrar vistas multiplanares (axial, coronal, sagital) sincronizadas.
- Permitir la creación de cortes oblicuos alineados con el eje del reborde alveolar.
- Ajustar brillo y contraste para mejorar la visualización de estructuras óseas y dentarias. (11–13,25–28)

En esta fase se realizan las primeras mediciones críticas:

- Altura ósea disponible.
- Anchura del reborde en diferentes niveles.
- Distancia a estructuras anatómicas (senos, canal mandibular, fosas nasales, raíces adyacentes).

Es fundamental comprender que el CBCT ofrece información volumétrica, pero está sujeto a artefactos (por ejemplo, por metales) y a variaciones de calidad ligadas a los parámetros de adquisición y al movimiento del paciente. Por ello, la interpretación del volumen debe combinarse con el juicio clínico y con otros registros. (11–13,25–28)

4.4.2. Fusión CBCT–modelo de superficie

Uno de los pasos clave en la planificación digital implantológica es la fusión del CBCT con un modelo de superficie (derivado de escáner intraoral o de laboratorio).

Teóricamente, este proceso consiste en:

- Identificar puntos o regiones comunes entre el volumen CBCT y el modelo de superficie (por ejemplo, superficies dentarias, paladar duro).
- Calcular una transformación rígida (rotaciones y traslaciones) que minimice la distancia entre ambos conjuntos de puntos.
- Aplicar dicha transformación para superponer de forma coherente el modelo de superficie sobre el volumen óseo. (14,15,25–28,34–37)

Desde el punto de vista matemático, se utilizan algoritmos de registro como ICP (*Iterative Closest Point*). Sin embargo, para el clínico lo importante es que:

- La fusión se verifique visualmente, comprobando que las superficies dentarias del modelo coinciden con las representadas en el CBCT.
- Se elijan zonas de referencia libres de artefactos y de movimiento (evitando, por ejemplo, áreas con prótesis removibles mal asentadas).

La calidad de esta fusión condiciona la posición final de los implantes respecto a la futura prótesis y a la anatomía ósea, por lo que constituye un punto crítico del flujo.

4.4.3. Definición de la prótesis objetivo (planificación protésicamente guiada)

El siguiente paso teórico clave es la definición de la prótesis objetivo, que puede hacerse de diferentes maneras:

- Encerado virtual de dientes ausentes, siguiendo criterios estéticos y funcionales.
- Digitalización de prótesis existentes o mock-ups diagnósticos.
- Utilización de bibliotecas de formas dentarias ajustables a las dimensiones del paciente. (23,24,29–33,38–40)

Desde la perspectiva conceptual, la prótesis define:

- La posición ideal de las superficies oclusales e incisales.
- La relación intermaxilar y la dimensión vertical.
- La ubicación de los puntos de contacto y las guías funcionales.

La planificación protésicamente guiada consiste en utilizar este diseño como referencia para determinar:

- El número de implantes necesarios.
- Su posición tridimensional (vestíbulo–palatino, mesio–distal, apico–coronal).
- Su angulación y profundidad. (4,8,14,23,24,29–33,34–37)

En un modelo teórico de buenas prácticas, la posición de los implantes nunca se decide exclusivamente en función del volumen óseo, sino en un equilibrio entre:

- Criterios protésicos (estética, oclusión, facilidad de higiene).
- Criterios anatómicos (disponibilidad y calidad ósea, estructuras vecinas).
- Criterios biomecánicos (distribución de cargas, longitudes de cantiléver).

El software proporciona las herramientas para visualizar este equilibrio, pero la jerarquización de los criterios corresponde al juicio clínico.

4.4.4. Selección y posicionamiento de implantes virtuales

El software de planificación incorpora librerías de implantes que representan la geometría real de los dispositivos disponibles: longitud, diámetro, macro y microdiseño de la superficie, plataforma de conexión, etc.

En la fase de posicionamiento se analizan:

- La coincidencia entre el eje del implante y la futura emergencia de la prótesis.
- La distancia a estructuras críticas (canal mandibular, piso sinusal, fosas nasales).
- La distancia a dientes vecinos y entre implantes (por ejemplo, separaciones mínimas mesio–distales recomendadas).
- La relación con el contorno óseo vestibular y palatino/lingual. (4,8,11–16,25–30,34–37)

Desde una perspectiva teórica, la planificación debe respetar márgenes de seguridad establecidos en la literatura frente a estructuras anatómicas y evitar posiciones que comprometan el espesor óseo vestibular, especialmente en el sector anterior maxilar.

Algunos programas ofrecen herramientas adicionales:

- Mapas de densidad ósea aproximada basados en el CBCT.
- Indicadores de distancia mínima en forma de códigos de color.
- Simulación de ángulos en relación con la línea oclusal o planos de referencia.

Estos recursos no sustituyen la evaluación del clínico, pero facilitan la toma de decisiones y permiten documentar de manera objetiva la planificación.

4.4.5. Diseño teórico de guías quirúrgicas estáticas

Aunque la fabricación y uso de guías quirúrgicas se detalla en otros capítulos, desde el punto de vista del software la cuestión central es cómo se traduce la planificación en un dispositivo físico.

El concepto de una guía es:

- Diseñar el tipo de soporte que no interfiera con el campo operativo: soportado por dientes, soportado por mucosa o soportado por hueso.
- Diseñar la superficie de contacto para que sea rígida y estable sin afectar el campo operativo.
- Insertar cajas virtuales o manguitos en alineación con el eje de los implantes que determinarán la ruta de las fresas.
- Considerar la compatibilidad de las fresas del kit quirúrgico y el diámetro interno de los manguitos, así como la altura para controlar la profundidad. (31–33, 34–37)
- Revisar los puntos de soporte para asegurar que sean suficientes para prevenir el vuelco.
- Permitir que el diseño sea parametrizable para adaptarse a diferentes sistemas quirúrgicos.

Todo esto está en un entorno virtual, pero tiene consecuencias en la práctica clínica y por lo tanto es importante entender estos principios en este caso, más allá de la simple ejecución mecánica de comandos.

4.4.6. Integración con navegación dinámica y robótica

En la cirugía guiada dinámica y la robótica, el rol del software se amplía:

- Debe generar un mapa de referencia tridimensional entre el paciente, el CBCT y la posición de la pieza de mano.
- Calcula en tiempo real la trayectoria de la fresa en relación con la planificación.
- Puede definir zonas de exclusión (por ejemplo, alrededores del canal mandibular) o restricciones de movimiento que el sistema robótico no permitirá exceder. (17–20,41–44)

Aunque los algoritmos queden en segundo plano, el clínico debe tener claro que:

- La precisión del sistema hanga de lo bien que se registre al paciente en la imagen.
- Cualquier movimiento de los marcadores o fallo de calibración arrastrará error al guiado.

El software deja de ser solo planificación para actuar como asistente en quirófano, lo que obliga a subir el listón en verificación y control de calidad.

4.5. Software CAD protésico orientado a implantología: principios de diseño

El diseño asistido por computadora (CAD) aplicado a prótesis sobre implantes constituye un campo en sí mismo, que integra principios de oclusión, estética, materiales y biomecánica.

4.5.1. Modelos digitales y preparación del entorno de diseño

El punto de partida del CAD protésico sobre implantes es la obtención de modelos digitales fiables, que incluyan:

- La posición de los implantes mediante scanbodies escaneados intraoralmente o en modelo.
- La anatomía de las arcadas antagonistas.
- El registro oclusal en máxima intercuspidación y, si es posible, en otras posiciones funcionales. (23,24,29–33,38–40)

En el software CAD, estos modelos se alinean y se establece un sistema de referencia espacial. Conceptualmente, es importante que:

- La posición virtual del scanbody coincida con la geometría real de la librería de implantes del sistema.
- Se definan planos de referencia (plano oclusal, plano estético, ejes faciales) que ayuden a orientar el diseño.

Una vez preparado el entorno, se selecciona el tipo de restauración: corona unitaria, puente, barra, prótesis híbrida, pilar personalizado, etc.

4.5.2. Librerías de implantes y componentes protésicos

El uso de librerías digitales proporcionadas por fabricantes de implantes o por desarrolladores de software es un aspecto central en la implantología CAD.

Desde el punto de vista teórico, estas librerías contienen:

- La geometría precisa de las conexiones implante–pilar (hexágonos, conos internos, conexiones externas, etc.).
- Las dimensiones de los tornillos, canales de acceso y emergencias.
- La morfología de pilares prefabricados, bases de titanio, interfaces para barras, entre otros. (23,24,29–33,34–37)

La correcta correspondencia entre el código del sistema seleccionado en el software y el sistema de implantes usado en la boca del paciente es esencial; cualquier error en este punto generará discrepancias de ajuste, tensiones internas e incluso imposibilidad de asentamiento de la prótesis.

4.5.3. Parámetros fundamentales del diseño protésico sobre implantes

El diseño protésico CAD sobre implantes debe respetar una serie de parámetros teóricos básicos:

- Espesores mínimos de material, según el tipo de restauración (metal, zirconia monolítica, disilicato de litio, resina de alta resistencia) y las recomendaciones del fabricante.
- Espacios de cemento en prótesis cementadas, si se diseñan cofias o estructuras; o diámetros adecuados de canales de tornillo en prótesis atornilladas.
- Pilar y perfil de emergencia:
 - Forma cóncava o convexa controlada para favorecer tejidos blandos estables y facilitar la higiene.
 - Transición suave entre plataforma del implante y corona. (21–24,29–33,38–40).
- **Contactos oclusales y proximales:**
 - Deben diseñarse de modo que se logre una distribución equilibrada de las fuerzas.
 - Pueden utilizarse mapas de presión virtuales para ajustar el nivel de contacto.

Teóricamente, el CAD permite anticipar la relación entre la prótesis y los tejidos, así como la interacción oclusal; sin embargo, siempre deben preverse ajustes clínicos en la fase de prueba, dado que la realidad funcional incluye variables que el modelo digital no captura por completo (elasticidad de la mucosa, movimientos mandibulares individuales, etc.).

4.5.4. Diseños de pilares personalizados

Un componente especialmente relevante del CAD implantológico es el diseño de pilares personalizados, que tienen como objetivo:

- Optimizar la emergencia de la restauración a través de la mucosa.
- Corregir angulaciones desfavorables de los implantes.
- Ajustarse con precisión al contorno gingival del paciente. (23,24,29–33,34–37).

Desde el punto de vista teórico, el diseño de un pilar personalizado implica:

- Definir una línea de terminación coherente con el contorno gingival, evitando sobrepreparaciones o líneas de acabado inadecuadas.
- Establecer una altura suficiente del muñón para garantizar la retención de la corona en caso de prótesis cementadas.
- Mantener espesores adecuados de material en la interfase con la corona para evitar fracturas.

Los pilares personalizados pueden fabricarse en titanio, zirconia o estructuras híbridas (pilares de zirconia con base de titanio). Cada material presenta propiedades mecánicas y ópticas específicas que deben considerarse en la fase de diseño.

4.5.5. Barras y estructuras para prótesis completas

En rehabilitaciones de arcadas completas, el software CAD se utiliza para diseñar:

- Barras de soporte para sobredentaduras.
- Estructuras metálicas o de zirconia para prótesis híbridas atornilladas.

Desde el punto de vista teórico, estos diseños deben contemplar:

- Secciones suficientes para resistir las cargas funcionales sin deformarse.
- Geometrías que faciliten la limpieza (superficies accesibles al cepillo y a los dispositivos de higiene).
- Longitudes de cantiléver acordes con la literatura, en función del número y distribución de implantes. (4,8,21–24,29–33,34–37)

El uso de articuladores virtuales y la simulación de movimientos mandibulares permiten ajustar mejor la forma de las crestas posteriores, las guías caninas y el esquema oclusal, contribuyendo a la estabilidad funcional del conjunto.

4.5.6. Validación digital y preparación para CAM

Una vez completado el diseño protésico, el software CAD incorpora normalmente herramientas de validación:

- Comprobación de espesores mínimos.
- Detección de choques entre estructuras (tornillos contra casquillos de retención, por ejemplo).
- Comprobación de que los ejes de inserción encajan con la geometría del implante y sus componentes.

Tras la validación, el diseño pasa al módulo CAM o a un centro de fresado externo para generar las trayectorias de mecanizado. En la práctica, este paso es el salto de lo virtual a lo físico; por eso es crítico que no se pierda información ni aparezcan errores de interpretación al cambiar de software. (25–30,31–33,38–40)

4.6. Flujo de trabajo digital en implantología: modelos y variantes

El flujo de trabajo digital en implantología puede definirse como la secuencia de procesos, soportados por software y dispositivos digitales, que transforma datos clínicos en decisiones terapéuticas y en soluciones protésicas finales. A diferencia del flujo analógico clásico, el flujo digital no consiste únicamente en “sustituir” pasos aislados (por ejemplo, impresiones de alginato por escaneos intraorales), sino en reorganizar la lógica completa del tratamiento sobre una base de información tridimensional continua. (4,8,11–16,25–30,34–37)

4.6.1. Fases fundamentales del flujo digital

De forma teórica, pueden distinguirse varias **fases encadenadas**, independientemente del tipo concreto de caso:

1. Fase de recogida de información clínica y diagnóstica

- Historia clínica, anamnesis médica y odontológica.
- Exploración intraoral y extraoral.
- Registros fotográficos (intraorales, extraorales, sonrisa).
- Pruebas complementarias: CBCT, radiografías 2D cuando proceda. (4,8,21–24)

2. Fase de adquisición de datos digitales anatómicos

- Escaneo intraoral de una o ambas arcadas.
- Escaneo de prótesis existentes, férulas diagnósticas o encerados.
- En algunos casos, escaneos faciales 3D. (11–16,25–28,38–40)

3. Fase de integración de datos y planificación virtual

- Importación de CBCT (DICOM) y modelos de superficie (STL/PLY).
- Fusión y registro anatómico.
- Definición de la prótesis objetivo mediante encerado virtual o modelos digitales.
- Planificación de la posición, número y angulación de implantes. (14,15,23,24,25–30,34–37)

4. Fase de diseño digital de dispositivos auxiliares

- Diseño de guías quirúrgicas estáticas.
- Diseño de férulas diagnósticas, provisionales o de carga inmediata.
- Diseño de pilares personalizados y estructuras protésicas. (25–30,29–33)

5. Fase de fabricación (CAM)

- Fresado de prótesis, barras o pilares.
- Impresión 3D de guías quirúrgicas y restauraciones provisionales.
- Postprocesado, acabado y verificación de los dispositivos fabricados. (25–30,31–33)

6. Fase de ejecución clínica

- Cirugía (guiada estática, navegación dinámica o cirugía convencional informada por el plan digital).
- Colocación de implantes y, en su caso, prótesis provisionales inmediatas.
- Ajustes clínicos sobre dispositivos fabricados según la respuesta biológica y funcional. (4,8,11–16,34–37,41–44)

7. Fase de seguimiento y mantenimiento

- Controles clínicos y radiográficos.
- Posibilidad de nuevos escaneos intraorales para comparar volumetría de tejidos en el tiempo.
- Actualización del “historial digital” del caso para futuras intervenciones o modificaciones protésicas. (21–24,29–33,38–40)

Durante la ejecución, algunas fases pueden solaparse o abreviarse, pero desde el punto de vista teórico esta secuencia permite identificar el rol del software en cada etapa y los puntos críticos donde la calidad de los datos condiciona el resultado posterior.

4.6.2. Modelos lineales vs. modelos cíclicos de flujo de trabajo

El flujo digital puede entenderse bajo dos esquemas conceptuales:

- **Modelo lineal:**
 - El proceso se concibe como una cadena secuencial en la que los productos de cada etapa sirven de entrada a la siguiente.
 - Ventaja: facilita la organización de tareas y la planificación temporal.
 - Limitación: puede inducir una visión rígida que no refleje la necesidad de revisar pasos previos a la luz de nueva información.
- **Modelo cíclico o iterativo:**
 - Asume que, en varias fases (planificación virtual, diseño CAD), a menudo hay que dar marcha atrás para retocar parámetros o volver a diagnosticar.
 - Introduce la realimentación: un diseño que topa con límites anatómicos obliga a replantear número o posición de implantes y, en casos límites, cambiar todo el plan de tratamiento. (14,15,23,24,25–30,34–37)

En implantología digital avanzada, el modelo cíclico encaja mejor: el software no solo ejecuta decisiones previas, sino que permite probar escenarios iterativamente hasta hallar el equilibrio ideal entre biología, biomecánica y estética

4.6.3. Variantes del flujo según el tipo de caso

Aunque la estructura general es bastante común, el flujo puede ajustarse teóricamente según:

- Casos individuales: el enfoque se centra principalmente en la precisión estética y la integración con los dientes vecinos.
- Casos parciales: el enfoque está en la armonización funcional con las partes vecinas.
- Arcos completos: el flujo es mucho más complejo: se incorpora la planificación oclusal global, el soporte labial y la dimensión vertical. (23, 24, 29–33, 38–40).
- **Protocolo de carga.** o Carga diferida: el flujo puede ser escalonado y la prótesis final se diseña y fabrica después de la osteointegración (con datos actualizados).
 - Carga inmediata: el flujo requiere que la prótesis provisional se diseñe y fabrique antes de la cirugía según la planificación para que la interdependencia entre las fases aumente. (4, 8, 34–37).
- **Tipo de enfoque quirúrgico.** o Cirugía guiada estática: necesita ser diseñada y producida antes de la cirugía.

- o Navegación dinámica: requiere que el taladro sea calibrado y que el software muestre la posición del taladro con respecto al plan en tiempo real.

- o Cirugía convencional "informada digitalmente": el plan se utiliza como un mapa conceptual, pero no se utilizan guías ni navegación. (11–13, 17–20, 41–44).

Al identificar estas diferencias, podemos ajustar la digitalización que es necesaria en cada caso para evitar el subuso (no uso de las herramientas útiles) y el sobreuso (tecnología adicional).

4.6.4. Roles del equipo en el flujo digital

Desde una perspectiva teórica, el flujo digital distribuye responsabilidades entre distintos miembros del equipo:

- **Implantólogo / cirujano oral**
 - o Responsable de la indicación, la planificación quirúrgica y la ejecución de la cirugía.
 - o Coordinador de la integración entre datos radiológicos y modelos digitales. (4,8,11–16,34–37)
- **Rehabilitador oral / prostodoncista**
 - o Define el plan protésico, las características estéticas y funcionales de la prótesis.
 - o Contribuye en el encerado virtual y en las decisiones sobre pilares, materiales y diseño final. (23,24,29–33,38–40)
- **Técnico de laboratorio digital**
 - o Maneja el CAD/CAM, diseña prótesis y guías según prescripciones clínicas.
 - o Añade criterio en relación con materiales, manufactura y acabado. (25–30,29–33,31–33)
- **Personal auxiliar y de gestión**
 - o Gestiona las agendas y la coordinación de tiempos entre clínica y laboratorio.
 - o Administra la documentación digital, consentimientos, registros de imágenes y comunicación con el paciente. (25–28,34–37)

El software actúa como espacio de encuentro entre estos roles: los proyectos digitales se convierten en el soporte común sobre el que se toman decisiones compartidas, lo que requiere habilidades de comunicación específicas en torno a modelos y representaciones tridimensionales.

4.6.5. Indicadores de calidad en el flujo digital

En un enfoque teórico de gestión de la calidad, es posible definir indicadores que evalúen la eficiencia y robustez del flujo:

- Porcentaje de casos en los que la posición final de los implantes se desvía más allá de un umbral predefinido respecto al plan.

- Número de rehacimientos protésicos (coronas, barras o guías) por discrepancias de ajuste.
- Tiempos promedio entre fases (planificación–cirugía, cirugía–prótesis provisional, provisional–definitiva).
- Incidencia de fallos técnicos (pérdida de datos, incompatibilidad entre archivos, errores de fabricación). (25–30,31–33,34–37,38–40)

A pesar de que estos indicadores pueden variar según el contexto, su conceptualización ayuda a estructurar auditorías internas y procesos de mejora continua en entornos que adoptan la implantología digital de forma sistemática.

4.7. Ciberseguridad, protección de datos y gestión de la información digital

El uso intensivo de software y de plataformas digitales en implantología no solo genera oportunidades clínicas, sino también responsabilidades en el ámbito de la ciberseguridad y la protección de datos personales. La información clínica generada por CBCT, escaneos intraorales, fotografías y registros protésicos constituye un conjunto de datos altamente sensibles, cuya gestión debe ajustarse a principios éticos y normativos. (4,8,21–24,38–40)

4.7.1. Clasificación de los datos en implantología digital

Teóricamente, puede distinguirse entre:

- **Datos identificativos**
 - Nombre, documento de identidad, dirección, teléfono, correo electrónico.
- **Datos clínicos generales**
 - Antecedentes médicos, alergias, medicación, diagnósticos sistémicos.
- **Datos odontológicos específicos**
 - Historias de tratamientos previos, diagnósticos de caries, enfermedad periodontal, oclusión.
- **Datos de imagen y modelos 3D**
 - CBCT, radiografías, fotografías intra/extraorales.
 - Escaneos intraorales, modelos STL/PLY, escaneos faciales.
- **Datos de planificación y diseño**
 - Posiciones virtuales de implantes.
 - Diseños CAD de prótesis, pilares, barras y guías.

La unión de estos diferentes tipos genera un perfil muy completo del paciente, cuya exposición no autorizada puede tener repercusiones tanto personales como profesionales.

4.7.2. Riesgos de seguridad en entornos digitales

Los riesgos pueden agruparse conceptualmente en:

- **Accesos no autorizados**
 - Intrusiones externas (ataques informáticos, robo de contraseñas).
 - Accesos internos indebidos (personal que consulta información sin estar implicado en el caso).
- **Pérdida o corrupción de datos**
 - Fallos de hardware (daños en discos, servidores).
 - Errores humanos (borrado accidental, sobreescritura de archivos).
 - Malware (ransomware, virus) que cifran o corrompen la información.
- **Fugas de datos en la nube**
 - Configuración insegura de servicios cloud.
 - Transmisiones no cifradas entre cliente y servidor.
 - Debilidades en los sistemas de autenticación remota. (25–28,38–40)

La implantología digital, al manejar archivos voluminosos y proyectos complejos, obliga a diseñar políticas específicas de seguridad adaptadas a grandes volúmenes de imagen y a flujos de trabajo colaborativos.

4.7.3. Medidas de seguridad técnicas y organizativas

Desde el punto de vista teórico, el marco de protección de datos debe incluir:

- **Medidas técnicas**
 - Uso de cifrado en tránsito (protocolos seguros) y, cuando sea posible, cifrado en reposo.
 - Sistemas de copias de seguridad automatizadas y redundantes (copias locales + externas).
 - Actualización periódica de sistemas operativos, software y soluciones antivirus.
 - Segmentación de redes (por ejemplo, separar la red clínica de la red de invitados).
- **Medidas organizativas**
 - Definición de roles y permisos de acceso: quién puede ver, editar o exportar datos clínicos.
 - Gestión de contraseñas (políticas de complejidad, caducidad, no compartición).

- Procedimientos para incorporación y salida de personal, asegurando la revocación oportuna de accesos.
- Protocolos para notificación y gestión de incidentes de seguridad. (25–28,34–37,38–40)

En implantología digital, estos principios se aplican tanto a los servidores de imágenes CBCT como a las estaciones de trabajo donde se ejecutan softwares de planificación y CAD.

4.7.4. Consentimiento informado y uso secundario de los datos

El consentimiento informado del paciente debe incluir de manera explícita:

- Autorización para la toma y el almacenamiento de imágenes CBCT y escaneos intraorales.
- Información sobre el uso de plataformas digitales y, cuando aplique, almacenamiento en la nube.
- En su caso, autorización diferenciada para el uso de datos (anonimizados) en docencia, investigación o publicaciones científicas. (4,8,21–24)

Desde una perspectiva teórica, es recomendable separar el consentimiento:

- Terapéutico (necesario para llevar a cabo el tratamiento implantológico).
- Docente / investigador (opcional, orientado a que el paciente decida si acepta el uso de sus datos con fines académicos o científicos).

Esta diferenciación refuerza la autonomía del paciente y clarifica el uso previsto de la información.

4.7.5. Normativa y principios éticos de protección de datos

Aunque las regulaciones concretas varían entre países, existen principios éticos compartidos:

Licitud, lealtad y transparencia: el tratamiento de los datos debe ser comprensible para el paciente y estar respaldado por bases legales adecuadas.

En cuanto a la limitación de la finalidad, básicamente los datos se recogen con objetivos muy concretos —diagnóstico, tratamiento, seguimiento— de modo que no pueden utilizarse para otra cosa a menos que medie un consentimiento nuevo.

Respecto a la minimización, la idea es guardar únicamente lo estrictamente indispensable y ya está.

En lo que toca a exactitud y actualización, pues hay que mantener los historiales correctos y al día sin excusas.

Por lo que se refiere al plazo de conservación, no procede almacenar indefinidamente lo que ya no sirve, salvo que la ley obligue a lo contrario.

Y en materia de integridad y confidencialidad, lo fundamental es blindar la seguridad frente a accesos no autorizados o pérdidas. (4,8,21–24,38–40)

Ahora bien, en implantología digital estos principios se traducen en políticas específicas para gestionar CBCT, modelos 3D y planificaciones; su lógica, no obstante, es la misma que en cualquier

historia clínica, con la salvedad de que aquí la capacidad de analizar y reutilizar datos —por ejemplo, para IA o big data— resulta mucho mayor, razón por la cual hay que extremar el cuidado en la anonimización y en conseguir consentimientos realmente claros.

4.8. Retos, limitaciones y control de calidad en la implantología digital

La implantología digital no es un escenario idealizado exento de dificultades; su despliegue real en clínicas y centros formativos está sujeto a retos técnicos, organizativos, económicos y formativos. Analizarlos teóricamente permite anticipar problemas y diseñar estrategias de implementación más realistas.

4.8.1. Curva de aprendizaje y competencias digitales

La adopción de flujos digitales exige que los profesionales desarrollen competencias que van más allá de la odontología clásica:

- Manejo de interfaces complejas (software de planificación, CAD/CAM).
- Comprensión de conceptos básicos de informática (formatos de archivo, almacenamiento, redes).
- Visión espacial tridimensional aplicada a modelos digitales. (14,15,25–30,34–37,38–40)

Esta **curva de aprendizaje** puede generar:

- Resistencia al cambio en profesionales con larga trayectoria analógica.
- Dependencia excesiva del personal más joven en la clínica, que se convierte en “intérprete digital” para el resto del equipo.
- Riesgo de errores por uso inadecuado o apresurado de herramientas complejas.

Teóricamente, la solución pasa por integrar formación digital de manera estructurada en la formación de grado y posgrado, y por establecer programas de actualización continua para clínicos en ejercicio.

4.8.2. Inversión económica y análisis de costo-efectividad

La implantología digital implica adquisición de:

- CBCT (cuando la clínica lo asume).
- Escáneres intraorales y ordenadores de alto rendimiento gráfico.
- Licencias de software (planificación, CAD/CAM, gestión de imágenes).
- Equipos de fabricación (fresadoras, impresoras 3D) y sus consumibles. (25–30,31–33,38–40)

Desde una perspectiva teórica, es necesario realizar análisis de costo-efectividad que consideren:

- Volumen y complejidad de casos implantológicos.
- Posibilidad de externalizar ciertas fases (planificación, fabricación de guías o prótesis) a centros especializados.

- Repercusión de la digitalización en los tiempos de tratamiento, la satisfacción del paciente y la tasa de complicaciones o retrabajos.

No todos los entornos requieren el mismo nivel de inversión; es posible implementar modelos progresivos donde se comienza por elementos clave (por ejemplo, CBCT y software de planificación) y se incorporan posteriormente otros (escáneres intraorales, impresión 3D), según la experiencia y la demanda.

4.8.3. Errores frecuentes en la adquisición y procesamiento de datos

En términos de control de calidad, los **errores sistemáticos** en las primeras fases del flujo digital tienen un efecto cascado sobre todo el proceso. Entre los más relevantes destacan:

Empezando por el CBCT de mala calidad: nos topamos con artefactos metálicos intensos que acaban entorpeciendo la lectura y la planificación; sumado a eso, los movimientos del paciente —ya sea por exposiciones largas o por falta de estabilización— terminan borrando detalle; y para rematar, un campo de visión inadecuado —demasiado justo o excesivamente ancho— acaba comprometiendo a la vez resolución y dosis. (11–13, 25–28)

En cuanto a los escaneos intraorales incompletos o distorsionados: resulta frecuente la falta de cobertura en zonas críticas para la guía (áreas de apoyo, dientes de referencia); además, estrategias de escaneado erráticas provocan “saltos” o solapamientos erróneos; y todo se complica todavía más en pacientes con rebordes edéntulos extensos y mucosa móvil. (15, 16, 25–28, 34–37)

Por lo que respecta a la fusión DICOM–STL imprecisa: suele haber uso de referencias poco estables (prótesis removibles mal asentadas); por si fuera poco, se aceptan alineaciones automáticas sin verificación visual; y como colofón, la falta de experiencia para detectar desajustes sutiles puede llegar a tener un impacto clínico significativo. (14, 15, 25–28, 34–37)

Estos errores se traducen en desviaciones de la posición real de los implantes respecto al plan y en desajustes protésicos, reforzando la necesidad de protocolos de verificación sistemática en cada fase.

4.8.4. Limitaciones inherentes de las herramientas digitales A pesar de su potencia, las herramientas digitales tienen limitaciones teóricas que deben ser reconocidas:

- El CBCT proporciona una representación de la densidad ósea relativa, no un valor exacto de resistencia mecánica; la interpretación de la “calidad ósea” a partir de la escala de grises es aproximada.
- De entrada, los modelos STL tan solo capturan la geometría superficial, así que la elasticidad de los tejidos queda fuera; por consiguiente, la respuesta de la mucosa bajo carga protésica solo puede estimarse a groso modo.
- En la misma línea, la simulación oclusal en articuladores virtuales se apoya en parámetros estandarizados que, todo hay que decirlo, no siempre reflejan la dinámica real de cada paciente. (21–24, 29–33, 38–40)

De ahí que, precisamente por eso, la implantología digital deba integrarse forzosamente en un enfoque que llegue a combinar datos cuantitativos junto con la experiencia clínica y, por supuesto, la exploración física directa del paciente.

4.8.5. Dependencia tecnológica y resiliencia del sistema Un reto particular es el riesgo de dependencia excesiva del entorno digital:

- Si la planificación sólo se entiende dentro del software, el equipo puede quedar paralizado ante un fallo técnico (caída del servidor, corrupción de archivos).
- Si se pierde el acceso a una plataforma propietaria o se interrumpe la licencia, el centro puede quedar sin acceso a planificaciones anteriores y diseños reutilizables.
- La ausencia de copias de seguridad actualizadas puede provocar pérdidas irreversibles de información clave. (25–30,34–37,38–40)

Teóricamente, la resiliencia del sistema requiere:

- Mecanismos de backup regulares y verificados.
- Estrategias de contingencia (por ejemplo, capacidad de trabajar temporalmente con métodos convencionales en caso de fallo grave).
- Políticas para evitar el bloqueo tecnológico con un único proveedor cuando esto no sea estrictamente necesario.

4.8.6. Sistemas de control de calidad y auditoría interna

Para garantizar un rendimiento consistente, el flujo digital debe integrarse en un sistema de control de calidad que incluya:

- Listas de verificación (*checklists*) por fase: adquisición CBCT, escaneado intraoral, fusión, planificación, diseño de guías, diseño protésico y fabricación.
- Registros de desviaciones detectadas (por ejemplo, discrepancias entre plan y resultado medido) para análisis posterior.
- Reuniones periódicas de revisión de procesos entre clínica y laboratorio, identificando puntos de mejora. (25–30,31–33,34–37,38–40)

La implantología digital se convierte así en un terreno propicio para aplicar metodologías de mejora continua (como los ciclos PDCA/PHVA), en las que el software no solo produce resultados clínicos, sino también datos de proceso que pueden ser analizados para optimizar la práctica.

4.9. Estándares, regulación y gestión de la calidad en el software implantológico

El uso de software en implantología digital no sólo se enmarca en el ámbito clínico y tecnológico, sino también en el de los estándares de calidad y la regulación sanitaria. Los programas utilizados para diagnosticar, planificar y diseñar tratamientos implantológicos se consideran, en muchos contextos, dispositivos médicos de software, sujetos a criterios de seguridad, rendimiento y trazabilidad. (4,8,21–24,38–40)

4.9.1. El software como dispositivo médico

Desde una perspectiva teórica, el software pasa a ser considerado dispositivo médico cuando:

- Se utiliza con fines de diagnóstico, planificación terapéutica o monitoreo de pacientes.
- Influye en decisiones clínicas que pueden tener impacto directo sobre la salud.
- Realiza cálculos o procesamiento que no son meramente administrativos, sino que afectan al resultado terapéutico. (4,8,21–24)

En implantología, esto incluye:

- Software de planificación 3D para posición de implantes.
- Plataformas que generan diseños de guías quirúrgicas.
- Sistemas CAD que calculan geometrías de barras y prótesis.
- Software de navegación dinámica o robótica asistencial. (11–16,17–20,34–37,41–44)

La consideración como dispositivo médico implica que el fabricante debe demostrar que el software es seguro, eficaz para su finalidad prevista y que cumple con los requisitos de gestión de riesgos y calidad establecidos por la normativa de cada región.

4.9.2. Clasificación del software según riesgo clínico

El nivel de exigencia regulatoria suele estar relacionado con el riesgo potencial asociado al uso del software:

- Riesgo bajo: programas orientados a visualización de imágenes sin funciones avanzadas de análisis; herramientas de gestión administrativa.
- En el escalón de riesgo moderado nos encontramos con software que echa una mano en la planificación implantológica, si bien el profesional sigue manteniendo un amplio margen de decisión y control; hablamos de sistemas que generan diseños para que luego se revisen manualmente.
- Subiendo al riesgo alto, ya entramos en software que interviene directamente en la ejecución —navegación, robótica— o bien automatiza decisiones críticas, de forma que un fallo podría acarrear consecuencias graves (pensad, por poner un caso, en colocar un implante dentro del canal mandibular). (17–20, 38–40, 41–44)

Dicho de otro modo, cuanto mayor sea el riesgo asociado, más imperativa se vuelve la necesidad de:

- Validar a fondo algoritmos y resultados.
- Poner en marcha mecanismos de alertas y límites de seguridad.
- Asegurar la trazabilidad de cada cambio y decisión.

Y aunque la clasificación formal dependa de cada marco regulatorio, el implantólogo ha de tener claro que no todos los softwares comparten la misma criticidad y, en consecuencia, su uso exige un nivel de prudencia proporcional al riesgo que gestionan.

4.9.3. Verificación, validación y gestión de riesgos

En ingeniería de software médico se distinguen dos conceptos clave:

- *Verificación*: comprobar que el software está construido correctamente respecto a sus especificaciones (por ejemplo, que una herramienta mide distancias con la precisión anunciada).
- *Validación*: comprobar que el software es adecuado para el propósito clínico previsto (por ejemplo, que la planificación 3D se corresponde con la realidad quirúrgica dentro de márgenes aceptables). (21–24,38–40)

En implantología digital, la gestión de la calidad del software implica:

- Definir y documentar los escenarios de uso clínico para los que el programa ha sido diseñado.
- Realizar pruebas en modelos, fantasmas o estudios clínicos que comparen los resultados del plan y la ejecución real.
- Analizar sistemáticamente los errores y desviaciones detectados, introduciendo medidas correctoras en las versiones posteriores.

Desde la perspectiva del usuario clínico, es recomendable:

- Conocer las limitaciones declaradas del software (por ejemplo, márgenes de error esperados en la cirugía guiada).
- Registrar internamente las discrepancias significativas entre plan y resultado, como parte de un sistema de mejora continua. (25–30,31–33,34–37,38–40)

4.9.4. Documentación, trazabilidad y registros electrónicos

Otro pilar de la calidad del software implantológico es la documentación exhaustiva del proceso:

- Manuales de usuario y guías de uso clínico seguro.
- Registros de versiones y cambios (historial de actualizaciones).
- Descripción de algoritmos críticos y supuestos de funcionamiento.

En la práctica clínica, la trazabilidad se extiende también a:

- Guardar copias de los proyectos de planificación (posición diseñada de implantes, guías, prótesis).
- Documentar qué versión del software se utilizó en cada caso.
- Archivar las comunicaciones con el laboratorio relacionadas con cada diseño protésico. (25–30,34–37,38–40)

Estos registros permiten:

- Revisar casos en los que se presenten complicaciones.

- Analizar si un problema deriva del plan, de la ejecución clínica, del diseño o de la fabricación.
- Facilitar auditorías internas y externas sobre la calidad del proceso implantológico.

4.9.5. Actualizaciones, mantenimiento y compatibilidad

El software implantológico está en constante evolución:

- Se corrigen errores detectados en versiones previas.
- Se añaden nuevas funciones (nuevos sistemas de implantes, módulos de IA, herramientas de simulación).
- Se mejora la interfaz, la velocidad de procesamiento o la compatibilidad con dispositivos. (25–30,34–37,38–40)

Desde el punto de vista teórico, las actualizaciones plantean varios desafíos:

- Mantener la compatibilidad con proyectos creados en versiones anteriores.
- Evitar que cambios en la interfaz o en los algoritmos afecten negativamente a la curva de aprendizaje o a la reproducibilidad de procedimientos.
- Garantizar que las nuevas funciones han sido validadas al menos con el mismo rigor que las ya existentes.

El implantólogo debe considerar:

- Establecer momentos concretos para la actualización (por ejemplo, evitando cambios bruscos en mitad de series de casos similares).
- Formarse en las novedades introducidas.
- Revisar los planes y bibliotecas de implantes tras grandes actualizaciones para asegurar su correcta correspondencia.

4.9.6. Responsabilidad compartida: fabricante, clínica y profesional

La calidad del software implantológico es fruto de una responsabilidad compartida:

- El fabricante debe diseñar, validar y documentar el software según estándares de ingeniería y regulación sanitaria.
- La clínica debe implementar políticas de seguridad, copias de seguridad, formación interna y control de versiones.
- El profesional tiene el deber de utilizar el software conforme a las indicaciones, comprender sus límites y no delegar su juicio clínico en el algoritmo. (4,8,21–24,38–40)

En última instancia, la herramienta digital es un medio al servicio de la atención al paciente. La calidad del resultado clínico depende de la interacción entre la tecnología, la organización y la competencia del profesional.

4.10. Tendencias futuras del software en implantología: IA, big data, gemelos digitales y realidad extendida

La evolución del software implantológico apunta hacia una integración creciente de tecnologías como la inteligencia artificial, el big data, los gemelos digitales y la realidad extendida. Estas tendencias no sustituyen los principios biológicos ni mecánicos de la implantología, pero transforman la manera en que se analizan los datos, se toman decisiones y se enseña la disciplina. (17–20,21–24,38–40,41–44)

4.10.1. Inteligencia artificial en la planificación y el diagnóstico implantológico

La inteligencia artificial (IA) y, en particular, el aprendizaje automático, permiten que el software:

- Reconozca patrones en grandes volúmenes de imágenes CBCT, radiografías y modelos 3D.
- Automatice tareas repetitivas, como la segmentación de estructuras anatómicas.
- Genere propuestas de planificación preliminares que el clínico puede revisar y modificar. (17–20,38–40,41–44)

Entre las aplicaciones teóricas más relevantes:

- Segmentación automática de estructuras críticas (canal mandibular, seno maxilar, raíces dentarias, corticales óseas).
- Detección de defectos óseos y propuestas de áreas de regeneración.
- Estimación de densidad ósea relativa y sugerencias de protocolo de fresado o de tipo de implante.
- Asistentes “inteligentes” que advierten de proximidades peligrosas entre implantes y estructuras anatómicas.

Es importante subrayar que la IA actúa como sistema de apoyo a la decisión, no como sustituto del criterio clínico. El implantólogo debe seguir validando las propuestas automáticas y comprender que los modelos se entrenan con datos que pueden no reflejar toda la variabilidad de la práctica real.

4.10.2. Big data y sistemas de apoyo a la decisión clínica

El concepto de big data se refiere a la capacidad de analizar grandes conjuntos de datos procedentes de:

- Planificaciones implantológicas realizadas en distintos centros.
- Resultados clínicos a largo plazo (supervivencia de implantes, complicaciones protésicas).
- Características demográficas y sistémicas de los pacientes.

Desde el punto de vista teórico, el análisis de estos datos permitiría:

- Identificar correlaciones entre variables (por ejemplo, ciertas configuraciones de implantes y tasas de éxito en determinado tipo de hueso).

- Desarrollar modelos predictivos que estimen la probabilidad de éxito de un plan dado determinadas condiciones.
- Generar sistemas de recomendación que sugieran opciones terapéuticas basadas en evidencia acumulada. (21–24,38–40)

La clave está en la anonimización y estandarización de los datos: sólo si la información se recoge de forma homogénea y se protege la identidad de los pacientes, será posible extraer conocimiento útil y éticamente aceptable.

4.10.3. Gemelos digitales en implantología

El concepto de gemelo digital implica la creación de un modelo virtual dinámico que representa la anatomía y la rehabilitación del paciente, y que se actualiza a medida que se obtienen nuevos datos (escaneos, radiografías, cambios clínicos).

En implantología, un gemelo digital podría incluir:

- Volumetría ósea (CBCT).
- Modelos de dientes y tejidos blandos.
- Diseño de implantes y prótesis.
- Información funcional (por ejemplo, registros oclusales dinámicos).

Teóricamente, este modelo permitiría:

- Simular la respuesta de los tejidos ante diferentes diseños protésicos u oclusales.
- Prever la evolución del soporte óseo en función de cargas, higiene o hábitos parafuncionales.
- Evaluar virtualmente alternativas de rehabilitación antes de intervenir. (38–40,41–44)

Aunque todavía se trata de una línea de desarrollo incipiente, el gemelo digital apunta hacia una implantología predictiva y personalizada, donde las decisiones se basan en simulaciones robustas del comportamiento del sistema a lo largo del tiempo.

4.10.4. Realidad aumentada, realidad virtual y realidad mixta

Las tecnologías de realidad extendida (XR), que incluyen realidad aumentada (AR), realidad virtual (VR) y realidad mixta (MR), abren nuevas posibilidades en:

- **Formación:**
 - Simuladores inmersivos que permiten practicar procedimientos implantológicos en entornos virtuales con feedback háptico.
 - Visualización 3D de casos complejos para planificación docente.
- **Planificación clínica:**
 - Superposición de modelos virtuales y fotografías faciales para evaluar el impacto estético de distintos diseños prostodónticos.

- **Asistencia intraoperatoria:**

- Visualización en gafas de realidad aumentada de trayectorias de implantes, distancias a estructuras críticas o información de navegación. (17–20,41–44)

Desde el punto de vista teórico, estas tecnologías no sustituyen al software de planificación convencional, pero proporcionan una capa de visualización e interacción que mejora la comprensión espacial y facilita la comunicación entre profesionales y con el paciente.

4.10.5. Automatización avanzada en CAD/CAM y robótica colaborativa

La progresiva automatización del diseño y la fabricación implica:

- Herramientas CAD que pueden proponer automáticamente morfologías anatómicas de coronas a partir de bibliotecas y patrones.
- Algoritmos que optimizan la disposición de estructuras en discos de zirconia o bloques de resina para minimizar residuos.
- Integración de sistemas robotizados o semiautónomos en la fase de fresado y manejo de materiales. (25–30,31–33,38–40)

En cirugía, la robótica colaborativa se orienta a:

- Sistemas que guían el movimiento de la fresa dentro de unos límites seguros definidos por la planificación.
- Plataformas que estabilizan la pieza de mano y corrigen desviaciones bruscas del operador. (17–20,41–44)

La implantología digital tiende así a un modelo donde el papel del profesional se centra en la toma de decisiones, supervisión y control, mientras que las tareas repetitivas o de alta precisión geométrica se delegan en máquinas.

4.10.6. Convergencia multimodal y salud conectada

Finalmente, la tendencia hacia la salud conectada puede llegar a integrar en el ecosistema digital implantológico:

- Dispositivos de monitorización del paciente (por ejemplo, sensores que detectan bruxismo nocturno o patrones de carga).
- Aplicaciones móviles que registran hábitos de higiene, tabaquismo u otros factores que influyen en el pronóstico de los implantes.
- Plataformas de teleodontología que permiten seguimiento remoto de determinadas fases del tratamiento, revisando fotografías o escaneos enviados por el paciente. (21–24,38–40)

Teóricamente, estos datos podrían incorporarse al gemelo digital y a los sistemas de apoyo a la decisión, generando una implantología más contextualizada en el estilo de vida real del paciente, aunque ello plantea desafíos adicionales de privacidad y gestión de la información.

4.11. Implicaciones docentes y formativas para el implantólogo digital

La consolidación de la implantología digital implica una transformación profunda de la formación universitaria y de la educación continua de los profesionales. No basta con añadir módulos tecnológicos aislados; es necesario redefinir el perfil de competencias del implantólogo contemporáneo. (4,8,11–16,25–30,34–37,38–40)

4.11.1. Perfil competencial del implantólogo digital

Desde una perspectiva teórica, el implantólogo digital integra tres grandes bloques de competencias:

1. Competencias clínicas y biológicas

- Conocimiento de anatomía, fisiología y patología oral y maxilofacial.
- Comprensión de los principios de osteointegración, biomecánica y oclusión.
- En primer lugar, se exige una habilidad quirúrgica y protésica bien asentada (4, 8, 11–16).

En segundo lugar, entramos en las competencias digitales específicas:

- Manejo solvente de CBCT y lectura crítica de volumetrías.
- Dominio de software de planificación implantológica, CAD y nociones básicas de CAM.
- Comprensión real de formatos de archivo, flujos de datos y principios de interoperabilidad (14, 15, 25–30, 34–37, 38–40).

Y en tercer lugar, aparecen las competencias transversales:

- Capacidad para moverse en equipos multidisciplinares —cirujanos, rehabilitadores, técnicos de laboratorio, informáticos—.
- Don de gentes para explicar al paciente los procedimientos digitales de forma llana y comprensible.
- Sensibilidad ética en torno a la protección de datos y la equidad en el acceso a la tecnología (21–24, 38–40).

En definitiva, el diseño curricular debe orientarse a desarrollar este perfil de manera equilibrada, evitando a un tiempo la hipertecnificación sin base biológica como el mantenimiento de enfoques tradicionales desconectados ya de la realidad tecnológica.

4.11.2. Integración de la implantología digital en el pregrado

En el grado de Odontología, la implantología digital puede introducirse de forma progresiva:

• Etapas iniciales

- Familiarización con modelos 3D anatómicos y uso básico de visualizadores de CBCT.
- Introducción a la oclusión y la anatomía dental a través de modelos digitales interactivos.

- **Etapas intermedias**

- Asignaturas de prótesis y rehabilitación que incluyan diseño CAD de restauraciones sencillas.
- Prácticas de lectura de CBCT bajo supervisión, identificando estructuras anatómicas relevantes.

- **Etapas finales**

- Módulos optativos o específicos de implantología digital, donde el alumno participe en planificación virtual de casos supervisados, diseño de guías y revisión de flujos protésicos digitales. (4,8,11–16,23,24,29–33,34–37)

El objetivo no es que el estudiante domine todo el ecosistema, sino que adquiera una alfabetización digital sólida, que le permita seguir aprendiendo y adaptarse a distintas soluciones tecnológicas en su práctica futura.

4.11.3. Formación de posgrado y educación continua

En programas de posgrado (especialidades, másteres) y en la educación continua para clínicos, la implantología digital puede abordarse con mayor profundidad:

- Seminarios sobre flujo digital integral en casos de distinta complejidad.
- Talleres prácticos de planificación 3D con diferentes softwares y, si es posible, con comparación entre plataformas.
- Entrenamiento en diseño CAD protésico y comprensión de materiales y procesos CAM.
- Módulos de navegación dinámica, cirugía guiada avanzada y robótica, cuando los recursos lo permitan. (14,15,25–30,34–37,38–40,41–44)

La educación continua debe responder al hecho de que los avances tecnológicos son rápidos; por lo tanto, se requieren programas flexibles y actualizables, no cursos puntuales que queden rápidamente desfasados.

4.11.4. Metodologías didácticas para enseñar implantología digital

Las metodologías docentes más apropiadas para la implantología digital combinan elementos teóricos y prácticos:

- **Aprendizaje basado en problemas (ABP)**

- Presentación de escenarios clínicos en los que el estudiante debe proponer y justificar un flujo digital razonado.

- **Simulación y laboratorios virtuales**

- Uso de software en entornos controlados para planificar casos y diseñar restauraciones sin riesgo para pacientes reales.

- **Aprendizaje basado en proyectos**
 - Desarrollo de pequeños proyectos digitales integrados (por ejemplo, planificar un caso, diseñar la guía y la prótesis provisional) con presentación final y discusión grupal.
- **Evaluación formativa mediante rúbricas**
 - Valoración de la capacidad del estudiante para justificar decisiones, identificar riesgos y usar herramientas digitales con criterio. (4,8,23,24,29–33,38–40)

4.11.5. Evaluación de competencias digitales y éticas

La evaluación de la implantología digital debe incluir dimensiones técnicas y éticas:

- **Dimensión técnica**
 - Capacidad para cargar y visualizar correctamente CBCT y modelos STL.
 - Habilidad para fusionar datos y detectar alineaciones incorrectas.
 - Coherencia en la planificación de implantes respecto a criterios anatómicos y protésicos.
 - Calidad de los diseños CAD propuestos.
- **Dimensión ética y de gestión de datos**
 - Comprensión de la importancia del consentimiento informado en procedimientos digitales.
 - Conocimiento básico de medidas de seguridad y confidencialidad.
 - Capacidad para identificar usos inapropiados de los datos (por ejemplo, compartir imágenes no anonimizadas fuera del entorno clínico). (4,8,21–24,38–40)

La evaluación puede apoyarse en:

- Exámenes prácticos en software.
- Portafolios digitales que recopilen planificaciones, diseños y reflexiones del estudiante.
- OSCE (Objective Structured Clinical Examination) adaptados a escenarios digitales, donde se valoren decisiones en tiempo limitado.

4.11.6. Rol de las universidades, sociedades científicas y la industria

El desarrollo armonioso de la implantología digital requiere la colaboración de:

- **Universidades**
 - Incorporan contenidos digitales en sus planes de estudio.
 - Fomentan la investigación en simulación, IA y flujos digitales aplicados a implantología.
- **Sociedades científicas**
 - Elaboran guías y consensos sobre buenas prácticas en implantología digital.
 - Ofrecen formación continua y acreditación específica en competencias digitales implantológicas.
- **Industria**
 - Desarrolla software y hardware alineados con estándares de calidad y necesidades reales de la práctica clínica.
 - Colabora con centros académicos para validar tecnologías en contextos controlados. (4,8,21–24,25–30,34–37,38–40)



CAPÍTULO 5

CASOS CLÍNICOS, INNOVACIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

5.1. Introducción

La implantología digital no es únicamente un conjunto de tecnologías aisladas —CBCT, escáneres intraorales, CAD/CAM, cirugía guiada o impresión 3D—, sino una manera distinta de concebir el diagnóstico, la planificación y la ejecución clínica. Su verdadero impacto se hace visible cuando se analiza cómo estas herramientas transforman casos concretos y modifican la experiencia tanto del profesional como del paciente. (4,8,11–16,23,24,25–30,34–37,38–40)

En capítulos previos se ha descrito de forma detallada la base biológica y mecánica de los implantes, los sistemas CAD/CAM, la cirugía guiada y el software que articula el flujo digital. En este capítulo, el objetivo es aterrizar esos conceptos en una serie de casos clínicos tipo, comparando la evolución desde los abordajes convencionales hacia los abordajes digitalmente asistidos y analizando las tendencias emergentes que apuntan hacia el futuro de la especialidad. Los casos que se presentan a continuación no deben entenderse como reportes aislados, sino como modelos de situación que reflejan escenarios frecuentes en la práctica clínica:

- Restauraciones unitarias en sectores estéticos.
- Rehabilitaciones parciales posteriores con exigencias funcionales elevadas.
- Rehabilitaciones de arcada completa sobre implantes.

En cada caso se analizan tres dimensiones:

1. *Perspectiva diagnóstica y de planificación*: qué información se necesita y cómo se integra.
2. *Ejecución clínica*: diferencias entre un abordaje convencional y uno digitalmente asistido.
3. *Resultados y experiencia del paciente*: impacto en tiempos, precisión, confort y previsibilidad. (4,8,21–24,29–33,34–37)

Tras la exposición de los casos, se presenta una discusión comparativa entre técnicas convencionales y digitales, seguida de un análisis de innovaciones clave (inteligencia artificial, impresión 3D avanzada, nuevos materiales) y de recomendaciones para integrar estas tendencias en la práctica cotidiana y en futuras líneas de investigación. (17–20,21–24,38–40,41–44)

5.2. Criterios para la selección y análisis de casos

Antes de describir los casos clínicos tipo, resulta útil explicitar algunos criterios teóricos que guían su construcción y análisis, dado que el propósito del capítulo es formativo y no meramente descriptivo.

5.2.1. Representatividad clínica Los casos seleccionados responden a situaciones que:

- Se presentan con frecuencia en la práctica implantológica.
- Tienen alto impacto en la calidad de vida del paciente (estética, masticación, fonación).
- Exigen un grado significativo de precisión y coordinación interdisciplinaria. (4,8,21–24,29–33)

De este modo, las lecciones extraídas tienen valor generalizable y pueden orientar decisiones en contextos diversos.

5.2.2. Comparabilidad entre abordajes convencionales y digitales

Para evaluar el verdadero aporte de la implantología digital, cada caso se analiza contrastando dos enfoques conceptuales:

- **Abordaje convencional:**
 - Impresiones físicas (alginato, siliconas).
 - Modelos de yeso y encerados diagnósticos manuales.
 - Planificación basada en radiografías 2D y experiencia clínica subjetiva.
 - Cirugía convencional sin guía o con guías simples basadas en modelos.
- **Abordaje digital:**
 - CBCT, escáner intraoral, modelos STL.
 - Planificación tridimensional protésicamente guiada.
 - Cirugía guiada estática o navegación dinámica, cuando procede.
 - CAD/CAM para provisionales y restauraciones definitivas. (11–16,23,24,25–30,31–33,34–37)

La comparación no se plantea como una confrontación dicotómica simplista, sino como un continuo de digitalización, donde es posible avanzar desde soluciones mixtas hasta flujos completamente digitales según recursos, experiencia y complejidad del caso.

5.2.3. Dimensiones de análisis: biológica, mecánica, funcional y psicosocial

Cada caso se considera desde cuatro perspectivas:

1. **Biológica**
 - Integridad de los tejidos duros y blandos.
 - Manejo del trauma quirúrgico y de la osteointegración.
2. **Mecánica**
 - Distribución de fuerzas sobre implantes y estructuras protésicas.
 - Diseño de pilares, perfiles de emergencia, barras y estructuras de soporte.
3. **Funcional**
 - Capacidad masticatoria.

- Estabilidad oclusal y comodidad en las funciones orales.

4. Psicosocial

- Estética percibida.
- Tiempos de tratamiento, comodidad del paciente y satisfacción global. (4,8,21–24,29–33,38–40)

La implantología digital se evalúa, por tanto, no sólo por la sofisticación tecnológica implicada, sino por su impacto concreto en estas dimensiones.

5.2.4. Limitaciones intrínsecas de los casos tipo

Es importante subrayar que los casos descritos son modelos académicos que integran características típicas de situaciones reales, pero no sustituyen la necesidad de individualizar las decisiones en cada paciente.

Además:

- No abarcan todas las posibles combinaciones de factores anatómicos, sistémicos o económicos.
- Se presentan en forma secuencial para fines didácticos, cuando en la realidad clínica puede haber ajustes iterativos y decisiones compartidas con el paciente. (21–24,29–33)

Con estos criterios claros, se procede a la descripción de los casos.

5.3. Caso clínico 1: Restauración unitaria anterior con flujo digital completo

5.3.1. Situación inicial y objetivos terapéuticos

Se plantea el caso tipo de un paciente joven adulto con pérdida de un incisivo central maxilar por traumatismo. La situación clínica se caracteriza por:

- Reborde alveolar relativamente conservado, con ligera reabsorción vestibular.
- Tejidos blandos delgados, con alta exigencia estética.
- Presencia de dientes adyacentes sanos y alineados.

Los objetivos terapéuticos incluyen:

- Obtener una restauración implantosoportada unitaria que imite la anatomía, el color y la translucidez del diente contralateral.
- Mantener o mejorar el contorno gingival y las papilas interdentes.
- Minimizar el número de intervenciones y el tiempo total de tratamiento, preservando el confort del paciente. (4,8,21–24,29–33,38–40)

5.3.2. Abordaje convencional: descripción y limitaciones

En un enfoque convencional, el tratamiento podría plantearse de la siguiente manera:

1. Evaluación clínica y radiográfica 2D

- Exploración intraoral.

- Radiografía periapical y panorámica.

2. **Modelo de estudio y encerado manual**

- Impresiones físicas con silicona o alginato.
- Modelos de yeso de maxilar y mandíbula.
- Encerado diagnóstico en cera del diente ausente.

3. **Cirugía de implante**

- Colocación del implante siguiendo referencias anatómicas estimadas a partir de radiografías 2D y experiencia del cirujano.
- En determinados casos, uso de una guía quirúrgica simple basada en el encerado y en un modelo de yeso perforado.

4. **Cicatrización y restauración protésica**

- Una vez finalizado el periodo de osteointegración, se procede a la toma de impresión convencional —ya sea con cubeta abierta o sin transferencia—.
- A continuación, se confecciona el pilar —prefabricado o personalizado mediante técnicas analógicas— junto con la corona, ya sea metal-cerámica o totalmente cerámica.
- Es cierto que este enfoque puede llegar a dar resultados satisfactorios en manos expertas; no obstante, en un caso de alta demanda estética se nos presentan limitaciones de peso:
 - Por un lado, la predicción del contorno final de los tejidos blandos resulta bastante limitada.
 - Por otro, se torna difícil garantizar que la emergencia protésica coincida justo con lo deseado respecto a la línea de sonrisa.
 - Margen de error mayor en la posición tridimensional del implante, especialmente en sentido vestibulo–palatino y apico–coronal. (4,8,21–24,29–33)

5.3.3. **Abordaje digital: integración de CBCT y escáner intraoral**

En el flujo digital completo, la planificación se basa en la integración de:

1. **CBCT de maxilar anterior**

- Permite valorar con precisión el espesor óseo vestibular, la altura disponible y la relación con la fosa nasal y el piso de la cavidad.
- Ayuda a determinar si es necesario realizar regeneración ósea guiada simultánea o diferida. (11–13,25–28,34–37)

2. **Escáner intraoral**

- Registro de la arcada superior, inferior y la oclusión.
- Captura de textura (cuando el escáner lo permite), que ayuda en el análisis estético.

- Obtención de modelos STL precisos sin necesidad de impresiones físicas. (15,16,25–28,34–37)

3. Encerado virtual

- Utilizando software CAD, se realiza un encerado digital del incisivo ausente, alineado con el diente contralateral, el plano oclusal y la línea media facial.
- Este diseño define la futura forma de la corona y el contorno gingival ideal. (23,24,29–33,38–40)

4. Fusión de datos (DICOM–STL)

- El modelo STL se fusiona con el volumen CBCT mediante el registro de superficies dentarias o palatinas.
- El resultado es un modelo tridimensional integrado que muestra simultáneamente hueso, dientes y prótesis virtual. (14,15,25–28,34–37)

5.3.4. Planificación protésicamente guiada y cirugía mínimamente invasiva

Sobre este modelo integrado se procede a la planificación protésicamente guiada:

- Se posiciona el implante virtual de forma que:
 - El canal del tornillo (en prótesis atornilladas) emerja por el cóngulo del diente o por una zona discreta de la cara palatina.
 - Se respete un espesor óseo vestibular mínimo que permita estabilidad a largo plazo.
 - Se evite invadir la fosa nasal o estructuras adyacentes. (4,8,11–16,25–30,34–37)

En función de la estabilidad primaria prevista y de la cantidad de hueso remanente, se decide entre:

- Colocación del implante y regeneración ósea simultánea, con o sin provisionalización inmediata.
- Realización de procedimientos previos de aumento óseo antes de la implantación.

Una vez definida la posición óptima, el software permite diseñar una guía quirúrgica dentosoportada que:

- Se apoya en dientes vecinos, asegurando alta precisión en el sector anterior.
- Incluye un *sleeve* metálico o equivalente alineado con el eje del implante.
- Prevé el uso del kit específico de fresas guiadas del sistema de implantes seleccionado. (31–33,34–37)

La cirugía se realiza con mínima incisión o incluso mediante técnica sin colgajo (*flapless*) cuando las condiciones lo permiten, reduciendo el trauma y favoreciendo la preservación de los tejidos blandos.

5.3.5. Provisionalización inmediata y perfil de emergencia digital Un elemento clave en el resultado estético es la forma del perfil de emergencia desde el cuello del implante hasta el margen gingival. El flujo digital permite:

- Diseñar un pilar provisional personalizado a partir del encerado virtual.
- Imprimir en 3D o fresar una corona provisional atornillada que modele la encía desde el primer día. (23,24,29–33,38–40)

En un escenario ideal:

- El mismo día de la cirugía se coloca un provisional implantosoportado que respeta la oclusión (sin contactos excesivos) y da soporte adecuado a las papilas.
- El paciente abandona la clínica con un diente estéticamente aceptable, lo que reduce el impacto psicosocial de la pérdida dentaria.

Con el paso de las semanas, se pueden realizar pequeños ajustes en el contorno del provisional para dirigir la arquitectura gingival; posteriormente se digitaliza esta situación (nuevo escaneo intraoral) y se diseña la corona definitiva replicando el perfil de emergencia logrado.

5.3.6. Comparación crítica entre abordaje convencional y digital

Desde una perspectiva analítica, en este caso tipo la implantología digital ofrece ventajas teóricas claras respecto al abordaje convencional:

- **Precisión tridimensional:**
 - Mayor control sobre la posición final del implante en relación con la prótesis y las estructuras anatómicas.
 - Reducción del riesgo de vestibulización excesiva o de colocación demasiado apical o coronal. (11–16,25–30,34–37)
- **Gestión de tejidos blandos:**
 - Diseño y control del perfil de emergencia desde el primer momento.
 - Mejores posibilidades para mantener o regenerar papilas y márgenes gingivales. (23,24,29–33,38–40)
- **Experiencia del paciente:**
 - Menor número de visitas para ajustes físicos de modelos y provisionales.
 - Posibilidad de provisionalización inmediata con alta precisión.
- **Documentación y comunicación:**
 - Registro digital completo del caso, útil para seguimiento, docencia e investigación.
 - Mejora de la comunicación clínica–laboratorio al compartir archivos digitales y planificaciones.

No obstante, también existen desafíos:

- Dependencia de una correcta adquisición y fusión de datos; errores en estas fases pueden comprometer la precisión de todo el flujo.

- Curva de aprendizaje para el manejo de software y dispositivos.
- Inversión económica en tecnologías de imagen, escaneo y fabricación digital. (25–30,31–33,34–37,38–40)

En suma, el flujo digital aporta un refinamiento significativo en casos unitarios estéticos, siempre que se respeten los principios biológicos y se mantenga un juicio clínico crítico frente a las propuestas del software.

5.4. Caso clínico 2: Rehabilitación parcial posterior asistida por flujo digital

5.4.1. Situación clínica y objetivos

Se considera ahora un caso tipo de rehabilitación parcial posterior en un paciente de mediana edad, con ausencias dentarias en el cuadrante inferior izquierdo (por ejemplo, piezas 36 y 37) y presencia de:

- Rebordes edéntulos moderadamente reabsorbidos.
- Dientes remanentes con restauraciones extensas pero funcionales.
- Signos leves de desgaste oclusal y antecedentes de bruxismo nocturno controlado.

Los objetivos terapéuticos son:

- Recuperar la función masticatoria del lado afectado mediante dos implantes posteriores.
- Establecer una corona o puente implantosoportado con buen ajuste oclusal y resistencia a cargas elevadas.
- Minimizar el riesgo de sobrecarga y de aflojamiento o fractura de tornillos o estructuras. (4,8,21–24,29–33,38–40)

5.4.2. Enfoque convencional: pasos y limitaciones

En un abordaje analógico clásico, el plan podría incluir:

1. *Radiografías 2D* (periapical y panorámica) para valorar altura ósea y distancia al canal mandibular.
2. *Modelos de yeso* obtenidos a partir de impresiones elásticas, con montaje en articulador.
3. *Diseño protésico* basado en encerado manual del segmento posterior, con ajuste oclusal en articulador.
4. *Cirugía de implantes* guiada por referencias anatómicas análogas (cresta ósea palpada, distancias medidas en radiografías).
5. *Impresiones posteriores* con pilares de impresión y confección de prótesis atornillada o cementada de forma manual.

Este enfoque puede proporcionar resultados clínicamente exitosos, pero presenta varias limitaciones en términos de:

- Precisión en la evaluación del grosor óseo residual y de la relación exacta con el canal mandibular.
- Capacidad de prever la distribución tridimensional de fuerzas sobre implantes y dientes remanentes.
- Potencial para diseñar estructuras protésicas que optimicen el espesor de material y la geometría frente a cargas de bruxismo. (4,8,21–24,29–33)

5.4.3. Abordaje digital: CBCT, análisis de riesgo y planificación 3D

El flujo digital introduce una serie de herramientas que refinan la toma de decisiones:

1. CBCT del sector posterior mandibular

- Evaluación del reborde en cortes axiales, sagitales y coronales.
- Cálculo preciso de la distancia vertical al canal mandibular.
- Identificación de la morfología de la cortical vestibular y lingual. (11–13,25–28,34–37)

2. Escáner intraoral y registro oclusal

- Obtención de modelos digitales superiores e inferiores.
- Registro de la relación intermaxilar en máxima intercuspidad.
- Posibilidad de analizar el esquema oclusal en el entorno virtual. (15,16,25–28,34–37,38–40)

3. Planificación protésicamente guiada

- Diseño virtual de las futuras coronas o puente implantosoportado.
- Definición de puntos de contacto, altura cuspal y forma de las fosas en relación con dientes antagonistas.
- Posicionamiento de los implantes en relación con la prótesis prevista y el hueso disponible. (23,24,29–33,38–40)

4. Análisis funcional y biomecánico básico

- Evaluación de la longitud de cantiléver (si se plantea extender la prótesis a zonas más distales).
- Diseño de un esquema oclusal que limite contactos excéntricos perjudiciales en un paciente con bruxismo controlado. (4,8,21–24,29–33)

5.4.4. Diseño de guías y soporte para regeneración ósea

En sectores posteriores mandibulares, la cirugía guiada puede ser especialmente útil para:

- Asegurar la distancia mínima al canal mandibular.
- Optimizar la angulación de los implantes para facilitar el diseño protésico.

El software de planificación permite:

- Diseñar una guía dentosoportada o mucoso-soportada (cuando el edentulismo es más extenso) que incluya sleeves para las fresas.
- Prever la realización de osteotomías complementarias si se planifica regeneración ósea o modificaciones del reborde. (31–33,34–37)

En casos con reborde muy estrecho, la planificación digital puede sugerir:

- Técnicas de expansión ósea.
- Colocación angulada de implantes para aprovechar la anchura disponible.
- Combinación con regeneración guiada, con previsión del volumen de injerto requerido. (4,8,11–16,21–24)

5.4.5. Flujo digital protésico: CAD/CAM para coronas posteriores

Una vez colocados los implantes y transcurrido el tiempo de osteointegración, el flujo protésico digital incluye:

- Escaneo intraoral con scanbodies específicos, que codifican la posición tridimensional de los implantes.
- Importación de los modelos digitales al software CAD para diseñar las coronas o el puente.
- Selección de material en función de las demandas funcionales:
 - Zirconia monolítica para alta resistencia.
 - Estructura de zirconia con recubrimiento cerámico en situaciones de mayor demanda estética.
 - Restauraciones de resina de alta resistencia para provisionales prolongados. (23,24,25–30,29–33,38–40)

El software CAD permite controlar:

- Espesores mínimos de material en las zonas de máxima carga.
- Geometría de las cúspides para distribuir fuerzas de manera más favorable.
- Diámetro y ubicación del canal del tornillo en prótesis atornilladas.

La fabricación se realiza mediante fresado o impresión 3D (según el material y el sistema disponible), lo que reduce la variabilidad derivada del modelado manual de cera y colado.

5.4.6. Comparación con un abordaje analógico en términos de resultados y eficiencia

Al comparar conceptualmente el abordaje convencional y el digital en este tipo de rehabilitación posterior, pueden destacarse varios puntos:

- **Seguridad anatómica:**
 - El uso de CBCT y guías reduce el riesgo de lesión del canal mandibular.

- La planificación tridimensional permite ajustar con precisión la longitud del implante. (11–13,25–28,34–37)
- **Adecuación biomecánica:**
 - El entorno CAD facilita el diseño de restauraciones con espesores adecuados y geometrías optimizadas para fuerzas elevadas.
 - Se reduce la probabilidad de sobrecargas puntuales por cúspides mal orientadas o contactos excéntricos no deseados. (23,24,29–33,38–40)
- **Eficiencia del proceso:**
 - Al disminuir la necesidad de repetir impresiones o ajustar coronas manualmente, se pueden reducir visitas y tiempos de sillón.
 - La comunicación con el laboratorio se agiliza al trabajar sobre archivos compartidos y proyectos digitales. (25–30,31–33,34–37)
- **Calidad percibida por el paciente:**
 - La precisión en ajuste y oclusión contribuye a una función más cómoda.
 - El paciente percibe un proceso más estructurado y tecnológicamente avanzado, lo que puede incrementar la confianza en el tratamiento.

Sin embargo, como en el caso anterior, el **éxito del flujo digital** depende de:

- La calidad de la adquisición de datos (CBCT, escáner).
- La correcta interpretación de la información por parte del profesional.
- La capacidad del equipo para gestionar de forma adecuada el software y el hardware implicados. (14,15,25–30,34–37,38–40)

5.5. Caso clínico 3: rehabilitación de arcada completa sobre implantes con flujo digital avanzado

5.5.1. Situación clínica y contexto

Este caso tipo representa uno de los escenarios más complejos y, al mismo tiempo, más característicos de la implantología contemporánea: la rehabilitación de una arcada completa (por ejemplo, maxilar superior) en un paciente edéntulo o prácticamente edéntulo.

El paciente nos llega con:

- Una pérdida dentaria generalizada a causa de periodontitis avanzada y/o caries muy extensas.
- Rebordes muy reabsorbidos —moderados o severos— con bastante desigualdad entre sectores anteriores y posteriores.
- Años usando prótesis removible que, la verdad, nunca le terminó de encajar bien funcionalmente.

- Expectativas estéticas muy altas y el claro deseo de una solución fija.

En el plano funcional y psicosocial, estamos ante alguien que:

- Le cuesta masticar determinados alimentos.
- Se siente inseguro al hablar o sonreír.
- Quiere una rehabilitación fija completa y, si es posible, en poquitas citas. (4,8,21–24,29–33,38–40)

Por todo ello, los objetivos terapéuticos pasan por:

- Devolver función masticatoria y estética de toda la arcada.
- Conseguir estabilidad a largo plazo tanto de los implantes como de la prótesis.
- Reducir al mínimo cirugías mayores —injertos extensos, elevaciones sinusales bilaterales— siempre que no se ponga en riesgo la seguridad biológica.

5.5.2. Abordaje convencional: flujo analógico para arcada completa

En un enfoque convencional, el procedimiento podría estructurarse en varias fases:

1. Estudio clínico y radiográfico básico

- Exploración intraoral y extraoral.
- Radiografía panorámica y, eventualmente, radiografías periapicales complementarias.
- Montaje de modelos en articulador con registros de mordida.

2. Planificación protésica y quirúrgica en modelos

- Encerado diagnóstico sobre modelos de yeso.
- En una primera fase, se diseña la prótesis completa fija o híbrida tomando como base la posición propuesta para los implantes.
- Acto seguido, se fabrican plantillas radiográficas y quirúrgicas apoyándose en los modelos físicos.

3. Cirugía de implantes

- Se procede a la extracción de restos radiculares en caso de que existan.
- La colocación de los implantes se guía tanto por referencias óseas como por plantillas analógicas.
- En función de la estabilidad primaria lograda, se baraja la posibilidad de carga inmediata con prótesis provisional atornillada o bien se opta por carga diferida.

4. Fase protésica

- Se toman impresiones con cubetas especiales, empleando pilares de impresión y registros intermaxilares.
- Se confeccionan barras metálicas o estructuras coladas buscando un ajuste pasivo, mediante procedimientos de prueba y soldadura.
- Se encadenan pruebas sucesivas: estructura, dientes montados en cera y, finalmente, la prótesis definitiva. (4,8,21–24,29–33)

Es innegable que este enfoque ha venido permitiendo durante décadas rehabilitaciones exitosas; sin embargo, arrastra limitaciones de peso:

- De entrada, menor previsibilidad en la distribución tridimensional de los implantes.
- A mayores, dificultad real para integrar de manera precisa las exigencias estéticas, fonéticas y funcionales ya en la planificación quirúrgica.
- Por si fuera poco, procesos protésicos largos, salpicados de visitas múltiples para ajustes y pruebas.
- Y para rematar, mayor variabilidad a la hora de conseguir ajuste pasivo en estructuras extensas. (4,8,21–24,29–33,38–40)

5.5.3. Flujo digital avanzado: diagnóstico integral y planificación 3D

- En este flujo digital avanzado para arcada completa, se combinan múltiples capas de información:
- 1. CBCT de arcada completa
- Permite evaluar altura y anchura ósea en cada región: premaxila, sectores posteriores, crestas residuales.
- Identifica la posición de senos maxilares, fosas nasales, conducto nasopalatino y demás estructuras.
- Ayuda a decidir si se opta por:
- Implantes convencionales acompañados de injertos.
- Configuraciones anguladas all-on-4 o variantes. (11–13, 25–28, 34–37, 41–44)
-

2. Escáner intraoral o escaneo de modelos

- · Si el paciente conserva algunos dientes, se escanean directamente..
- Si es completamente edéntulo, se pueden escanear prótesis provisionales bien adaptadas o registros funcionales digitalizados.

- Se registran también fotografías y, en algunos casos, escaneo facial 3D para integrar contextos estéticos faciales. (15,16,23,24,29–33,38–40)

5. Prótesis inicial de referencia (prótesis diagnóstica)

- Se diseña o ajusta una prótesis completa (o prótesis inmediata) que defina:
 1. Posición de incisales, plano oclusal, soporte labial.
 2. Dimensión vertical y relación céntrica.
- Esta prótesis diagnóstica puede:
 1. Escanearse y fusionarse con el CBCT.
 2. O bien usarse como guía radiográfica durante el CBCT para captar la relación entre la futura prótesis y el hueso. (23,24,29–33,38–40)

6. Fusión de datos y encerado virtual de arcada completa

- Los archivos STL (de la prótesis diagnóstica y/o de los rebordes escaneados) se fusionan con el CBCT.
- Se realiza un encerado virtual de los dientes de toda la arcada, ajustando anatomía, proporciones y relación con el rostro.
- Este encerado virtual sirve de “punto de partida” para distribuir implantes de manera protésicamente guiada. (14,15,25–28,34–37)

5.5.4. Distribución de implantes y cirugía guiada en arcada completa

Con el modelo integrado se procede a la planificación tridimensional de la distribución de implantes:

- Se determinan el número y la posición de los implantes en función de:
 - Calidad y cantidad de hueso disponible.
 - Requerimientos estéticos (posición de emergencia de los pilares).
 - Necesidad o no de cantiléver distal. (4,8,11–16,21–24,34–37,41–44)

Algunas configuraciones típicas teóricas incluyen:

- Cuatro implantes (dos anteriores axiales y dos posteriores angulados), con prótesis fija tipo puente completo.
- Seis implantes distribuidos entre sectores anterior y posterior, cuando el volumen óseo lo permite y se desea minimizar cantiléver.

El software permite:

- Visualizar simultáneamente los implantes virtuales y la arcada protésica.
- Ajustar angulaciones para optimizar la emergencia de los tornillos (en prótesis atornilladas) o la posición de los pilares.

- Analizar la relación con estructuras anatómicas de riesgo (senos maxilares, fosas nasales, canal nasopalatino). (11–13,25–28,34–37,41–44)

Una vez definida la planificación, se diseña una guía quirúrgica de arcada completa, que puede ser:

- Dentosoportada (si quedan dientes remanentes que se extraerán en un segundo tiempo).
- Mucoso–soportada, con diseño englobando rebordes residuales y zonas de apoyo.
- Osteosoportada en determinados protocolos, aunque esto requiere cirugías más invasivas.

La cirugía guiada en arcada completa favorece:

- La colocación simultánea de varios implantes en posiciones predefinidas.
- La posibilidad de ajustar el diseño de la prótesis provisional de carga inmediata sobre posiciones previstas con precisión. (31–33,34–37,41–44)

5.5.5. Protocolo de carga inmediata y prótesis provisional digital

El flujo digital avanzado permite realizar protocolos **de carga inmediata** cuando se obtiene una estabilidad primaria adecuada de los implantes y el caso está bien seleccionado.

1. Prótesis provisional planificada

- A partir del encerado virtual y de la posición de los implantes, se diseña una prótesis provisional completa atornillada.
- La prótesis se fabrica por CAD/CAM (resina fresada o impresa) antes de la cirugía o se deja lista para rápida producción inmediatamente después. (23,24,25–30,29–33,38–40)

2. Adaptación intraoperatoria

- Tras colocar los implantes, se toma un registro de la posición real (con scanbodies o técnicas híbridas) para confirmar el ajuste.
- Se realizan pequeñas modificaciones si el protocolo lo requiere, pero el objetivo es que el provisional se adapte con mínima intervención manual.

3. Fase de cicatrización y remodelado de tejidos

- Durante varias semanas o meses, el provisional guía la maduración de tejidos blandos y la función masticatoria.
- Pueden realizarse ajustes oclusales para equilibrar cargas y evitar sobrecargas tempranas.

4. Prótesis definitiva

- Cuando los tejidos están estables, se realiza un nuevo escaneo intraoral con la prótesis provisional y scanbodies para:
 - Capturar el perfil de emergencia logrado.

- Diseñar la prótesis definitiva (por ejemplo, una estructura de zirconia o titanio con recubrimiento). (23,24,29–33,38–40)

El resultado es una secuencia en la que el flujo digital sincroniza la cirugía, la carga inmediata y el diseño protésico, reduciendo tiempos y visitas.

5.5.6. Comparación con abordaje convencional y retos del flujo digital

En rehabilitaciones de arcada completa, la comparación teórica entre abordajes arroja:

- **Ventajas del flujo digital avanzado**
 - Mayor coordinación entre plan protésico y distribución de implantes.
 - Posibilidad de carga inmediata basada en planificación precisa.
 - Reducción de pruebas protésicas intermedias gracias a CAD/CAM.
 - Mejor documentación del caso, con proyectos digitales reutilizables o revisables. (11–16,23,24,25–30,34–37,38–40,41–44)
- **Desafíos específicos**
 - La fusión de datos en pacientes edéntulos es más compleja; se requiere experiencia para alinear CBCT, rebordes y prótesis diagnósticas.
 - La precisión de guías mucoso–soportadas puede verse afectada por la compresibilidad de la mucosa; se necesitan diseños y protocolos de fijación cuidadosos.
 - El coste y la complejidad de hardware y software son mayores que en casos unitarios o parciales.
 - La curva de aprendizaje es significativa, tanto para el equipo clínico como para el laboratorio. (25–30,31–33,34–37,38–40)

En síntesis, el flujo digital avanzado para arcada completa potencia la previsibilidad y la capacidad de ofrecer carga inmediata fija, pero exige un nivel alto de organización, recursos y formación, lo que hace que su implementación deba planificarse de forma gradual y estratégica en cada entorno clínico.

5.6. Síntesis comparativa sistemática entre técnicas convencionales y digitales

Tras la exposición de los casos tipo (unitario anterior, parcial posterior y arcada completa), resulta útil plantear una síntesis comparativa más sistemática entre abordajes convencionales y digitales, no sólo caso a caso, sino a través de las grandes fases del proceso implantológico.

5.6.1. Marco de comparación

Para analizar de manera estructurada las diferencias entre técnicas convencionales y digitales, se proponen los siguientes ejes de comparación:

1. Diagnóstico y planificación

2. Ejecución quirúrgica
3. Fase protésica
4. Mantenimiento y seguimiento
5. Experiencia del paciente y eficiencia organizativa
6. Formación y dependencias tecnológicas

En cada eje, se comparan los dos enfoques desde el punto de vista de:

- Precisión y control.
- Complejidad y recursos requeridos.
- Potencial de error y mecanismos de control de calidad. (4,8,11–16,21–24,25–30,34–37,38–40)

5.6.2. Diagnóstico y planificación

Enfoque convencional

- Se basa en:
 - Radiografía panorámica y periapical.
 - Modelos de yeso y encerado manual.
 - Valoración clínica subjetiva de la anatomía y del espacio protésico.
- Las decisiones se apoyan fuertemente en la experiencia del clínico y en la interpretación de imágenes 2D.

Enfoque digital

- Integra:
 - CBCT para volumetría ósea y estructuras anatómicas.
 - Escáner intraoral y modelos STL de precisión.
 - Encerado virtual y simulación protésicamente guiada.
- Permite:
 - Visualizar el caso de forma tridimensional.
 - Probar virtualmente diferentes planes (número y posición de implantes) antes de intervenir.
 - Incorporar herramientas de análisis (densidad ósea relativa, distancia a estructuras críticas). (11–16,23,24,25–30,34–37)

Comparación teórica

- La planificación digital proporciona un mapa detallado del caso, reduciendo incertidumbre y facilitando decisiones justificadas.
- El enfoque convencional puede ser eficaz en manos muy entrenadas, pero depende en gran medida de la intuición y del “ojo clínico”, lo que dificulta la estandarización y la transferencia de conocimiento.

5.6.3. Ejecución quirúrgica

Enfoque convencional

- Cirugía basada en referencias anatómicas palpables, medidas obtenidas en radiografías 2D y experiencia del cirujano.
- Uso ocasional de guías simples elaboradas en modelos físicos, con precisión limitada.
- Adaptación intraoperatoria frecuente del plan según hallazgos clínicos.

Enfoque digital

- Cirugía guiada estática:
 - Uso de guías quirúrgicas dentosoportadas o mucoso–soportadas basadas en planificación 3D.
 - Posibilidad de técnicas mínimamente invasivas (sin colgajo en casos seleccionados).
- Navegación dinámica y robótica (donde esté disponible):
 - Retroalimentación en tiempo real sobre posición de fresas e implantes respecto al plan.
 - Mayor control en casos anatómicamente complejos. (11–16,17–20,31–33,34–37,41–44)

Comparación teórica

- El flujo quirúrgico digital tiende a:
 - Reducir la variabilidad en la posición real de los implantes.
 - Disminuir el tiempo quirúrgico en ciertos escenarios.
 - Facilitar la ejecución de protocolos de carga inmediata basados en posiciones previstas.
- Sin embargo, requiere:
 - Una preparación previa más intensa.
 - Mayor dependencia de la calidad de los datos diagnósticos y de la fabricación de guías.

5.6.4. Fase protésica

Enfoque convencional

- Impresiones físicas con materiales elásticos y cubetas individuales.
- Modelos de yeso y articuladores mecánicos.
- Diseño protésico manual (encerado, colado, estratificación cerámica).

Enfoque digital

- Toma de registros mediante escáner intraoral y/o escáner de modelos.
- Uso de scanbodies para registrar la posición de implantes.
- Diseño CAD de coronas, puentes y estructuras completas.
- Fabricación por fresado o impresión 3D. (23,24,25–30,29–33,38–40)

Comparación teórica

- El flujo protésico digital:
 - Reduce la dependencia de impresiones físicas y yesos (evitando distorsiones y fracturas de modelos).
 - Permite reproducibilidad y fácil modificación de diseños.
 - Facilita la consecución de espesores de material adecuados y morfologías oclusales optimizadas.
- El enfoque analógico puede ser muy preciso en manos expertas, pero tiene:
 - Mayor variabilidad entre diferentes técnicos.
 - Mayor consumo de tiempo y riesgo de rehacimientos.

5.6.5. Mantenimiento, seguimiento y documentación

Enfoque convencional

- Documentación basada en historias clínicas físicas, radiografías impresas y modelos almacenados.
- Limitaciones para comparar volumétricamente cambios óseos o de tejidos blandos.

Enfoque digital

- Historias clínicas electrónicas con integración de imágenes y modelos 3D.
- Posibilidad de realizar escaneos de control y comparar en el tiempo la volumetría de tejidos.
- Facilidad para compartir información con otros profesionales o para fines docentes e investigativos, siempre que se respeten la confidencialidad y la protección de datos. (21–24,25–30,38–40)

Comparación teórica

- El entorno digital crea un historial tridimensional del paciente, que enriquece las posibilidades de seguimiento y análisis.
- Sin embargo, introduce desafíos de ciberseguridad, gestión de datos y requerimientos de almacenamiento que deben abordarse con políticas específicas.

5.6.6. Experiencia del paciente y eficiencia organizativa

Experiencia del paciente

- El enfoque digital suele percibirse como:
 - Más cómodo (menos impresiones físicas, menos citas de prueba).
 - Más moderno y tecnológicamente avanzado, lo que puede aumentar la confianza.
- La capacidad de mostrar al paciente simulaciones y diseños virtuales mejora la comunicación y la toma de decisiones compartidas. (23,24,29–33,38–40)

Eficiencia organizativa

- El flujo digital puede:
 - Reducir tiempos globales de tratamiento, especialmente en rehabilitaciones complejas.
 - Optimizar la coordinación clínica–laboratorio.
 - Facilitar la estandarización de procedimientos y la formación interna del equipo.
- No obstante, requiere:
 - Inversión inicial significativa.
 - Reorganización de procesos y roles.
 - Estrategias de amortización y análisis de costo-efectividad. (25–30,31–33,34–37,38–40)

5.6.7. Formación, cultura profesional y dependencia tecnológica

El paso de un modelo convencional a uno digital implica también cambios en la cultura profesional:

- El clínico pasa de ser un “artesano analógico” a un gestor de información digital y de decisiones basadas en datos.
- El laboratorio se transforma en un entorno CAD/CAM, con técnicos que trabajan con software y máquinas de fabricación.
- El equipo clínico debe desarrollar competencias digitales para interpretar planificaciones y manejar herramientas avanzadas. (4,8,11–16,25–30,34–37,38–40)

Al mismo tiempo, aumenta la dependencia tecnológica:

- Fallos de software, hardware o conectividad pueden afectar más directamente el flujo de trabajo.

- Se requiere un plan de contingencia que permita continuar atendiendo pacientes (aunque sea de manera parcial) ante incidencias técnicas.

5.7. Innovaciones emergentes: IA clínica, impresión 3D avanzada y nuevos materiales

La implantología digital está entrando en una fase en la que ya no se limita a trasladar procesos analógicos a un entorno virtual, sino que genera capacidades nuevas que no existían en la era convencional. Entre las innovaciones más relevantes se encuentran la inteligencia artificial aplicada en clínica, la impresión 3D avanzada y la incorporación de nuevos materiales diseñados específicamente para integrarse en flujos digitales. (17–20,21–24,25–30,38–40,41–44)

5.7.1. Inteligencia artificial en el diagnóstico y la planificación

La inteligencia artificial (IA), en sus variantes de *machine learning* y *deep learning*, permite que los softwares implantológicos:

- Reconozcan patrones complejos en imágenes CBCT y radiografías 2D.
- Segmenten automáticamente estructuras anatómicas relevantes.
- Propongan configuraciones iniciales de implantes o tratamientos de forma semiautomática. (17–20,38–40,41–44)

Entre las aplicaciones teóricas más destacadas se encuentran:

1. Segmentación automática de estructuras críticas

- El software identifica el canal mandibular, los senos maxilares, la fosa nasal y otras estructuras de riesgo sin intervención manual.
- Esto reduce el tiempo dedicado a tareas repetitivas y minimiza la probabilidad de omitir detalles relevantes, especialmente en casos complejos.

2. Detección de patrones patológicos

- Algoritmos entrenados con grandes bases de datos pueden sugerir la presencia de lesiones óseas, alteraciones sinusales o signos compatibles con patología periapical o periodontal.
- En un contexto implantológico, estos sistemas pueden ayudar a detectar factores que desaconsejen un determinado plan quirúrgico.

3. Propuestas preliminares de planificación implantológica

- A partir de la anatomía y del encerado virtual, la IA puede sugerir posiciones tentativas de implantes, longitudes y diámetros basados en casos previos similares.
- El clínico conserva el control de la decisión, pero se beneficia de una “segunda opinión” basada en datos. (17–20,38–40,41–44)

Estas aplicaciones no sustituyen el criterio profesional, pero contribuyen a una planificación más eficiente y sistemática, especialmente en entornos con alto volumen de casos.

5.7.2. IA en pronóstico, soporte a la decisión y personalización

Más allá de la planificación anatómica, la IA tiene potencial para participar en modelos pronósticos y sistemas de apoyo a la decisión:

- **Modelos de riesgo individualizado**
 - Integrando variables clínicas (calidad ósea estimada, hábitos del paciente, comorbilidades sistémicas) y datos de resultados a largo plazo, la IA puede estimar la probabilidad de supervivencia de los implantes o el riesgo de complicaciones protésicas.
- **Sistemas de recomendación clínica**
 - Ante un conjunto de datos, el programa puede sugerir:
 - Número mínimo de implantes para una rehabilitación completa.
 - Preferencia por determinados protocolos (carga inmediata vs diferida, regeneración simultánea vs diferida).
 - Ajustes en diseño protésico (materiales, tipo de conexión, diseño de pilares).
- **Optimización de agendas y flujos de trabajo**
 - Herramientas de IA integradas en la gestión clínica pueden predecir duración de citas, probabilidad de reprogramaciones y necesidades de seguimiento, ayudando a organizar mejor la atención. (21–24,25–30,38–40)

Teóricamente, estos sistemas abrirían paso a una implantología altamente personalizada, en la que cada paciente recibe un plan adaptado no sólo a su anatomía, sino también a su perfil de riesgo biológico y conductual.

5.7.3. Impresión 3D avanzada y fabricación aditiva

La impresión 3D ha pasado de ser un recurso experimental a convertirse en un pilar de la implantología digital. La fabricación aditiva permite producir:

- Modelos anatómicos de alta precisión.
- Guías quirúrgicas.
- Férulas y provisionales.
- En algunos contextos, estructuras definitivas. (25–30,31–33,38–40)

Las innovaciones más relevantes incluyen:

1. **Tecnologías de impresión de alta resolución**
 - Procesos como la estereolitografía (SLA) o la impresión por luz estructurada permiten capas muy finas y detalles precisos.

- Esto resulta crítico para guías quirúrgicas y modelos donde la exactitud dimensional es esencial.

2. Impresión multimaterial y gradiente de propiedades

- Se exploran sistemas capaces de combinar materiales de diferentes durezas o elasticidades en una sola pieza, lo que abre posibilidades para:
 - Férulas con zonas rígidas y zonas más flexibles.
 - Prótesis provisionales con zonas reforzadas y otras de mayor confort.

3. Impresión directa de estructuras metálicas

- Tecnologías como la fusión selectiva por láser (SLM) permiten imprimir directamente estructuras de titanio o aleaciones de cromo–cobalto.
- En implantología, esto se traduce en barras, estructuras de puentes completos y posiblemente implantes personalizados. (25–30,31–33,38–40)

4. Impresión bioinspirada y bioprinting (perspectiva teórica)

- A medio y largo plazo, se exploran conceptos de bioprinting de tejidos o andamios que favorezcan la regeneración ósea y de tejidos blandos.
- Aunque la aplicación clínica directa en implantología aún es limitada, el potencial de combinar andamios impresos con células y factores de crecimiento es un campo de investigación emergente.

5.7.4. Nuevos materiales para prótesis e implantes en el contexto digital

La digitalización también ha impulsado la aparición de materiales especialmente diseñados para ser trabajados mediante CAD/CAM:

1. Zirconia de alta translucidez

- Combina resistencia mecánica y propiedades estéticas mejoradas.
- Permite coronas y puentes altamente estéticos sin necesidad de recubrimientos cerámicos extensos, reduciendo el riesgo de descamación.

2. Cerámicas híbridas y resinas reforzadas

- Materiales híbridos que combinan matriz polimérica y carga cerámica, ofreciendo:
 - Mejor absorción de impactos.
 - Posibilidad de fresado rápido.
 - Reparabilidad intraoral relativamente sencilla.

3. Polímeros de alto rendimiento (PEEK, PEKK)

- Plásticos de alto módulo, biocompatibles, que pueden utilizarse como estructuras ligeras y con cierto grado de elasticidad.

- Se exploran como alternativas para barras de sobredentaduras o estructuras de puentes en situaciones seleccionadas.

4. Implantes de zirconia y superficies modificadas

- Desde una perspectiva biológica, se estudian implantes de zirconia como alternativa estética y potencialmente bioinertemente más favorable en pacientes con demandas especiales.
- Al mismo tiempo, se desarrollan superficies de titanio micro/nanoestructuradas para optimizar la osteointegración. (4,8,11–16,21–24,38–40)

Estos materiales no sólo amplían las opciones terapéuticas, sino que dialogan de forma natural con el entorno digital, al estar diseñados desde el principio para ser fresados o impresos, mejorando la precisión y reproducibilidad de las restauraciones.

5.8. Perspectivas futuras en implantología digital

Las innovaciones descritas apuntan hacia una implantología en la que la **información**, más que el material o el dispositivo aislado, será el recurso central. El horizonte teórico de la implantología digital incorpora conceptos como gemelos digitales, salud conectada, automatización avanzada, así como reflexiones sobre ética y equidad. (17–20,21–24,38–40,41–44)

5.8.1. Personalización extrema y gemelos digitales

El concepto de gemelo digital implica tener un modelo virtual dinámico del paciente que:

- Incluya anatomía ósea, estructuras dentarias y tejidos blandos.
- Integre la prótesis, los implantes y la oclusión.
- Se actualice con cada nuevo escaneo o radiografía.

En una visión futura:

- El gemelo digital podría simular cómo se comportará la rehabilitación bajo diferentes condiciones de carga, cambios de hábitos o envejecimiento.
- Podría utilizarse para explorar distintas alternativas de tratamiento antes de intervenir, reduciendo la incertidumbre.
- Permitiría hacer un seguimiento a largo plazo comparando el comportamiento real con el comportamiento simulado, ajustando el plan cuando sea necesario. (38–40,41–44)

Esta aproximación convertiría al tratamiento implantológico en un proceso altamente individualizado y dinámico, en el que las decisiones se revisan sobre la base de datos y modelos vivos.

5.8.2. Integración con la salud conectada y la odontología 4.0

En el marco más amplio de la “salud conectada” y de la llamada “Odontología 4.0”, la implantología se conectará con:

- **Dispositivos portátiles (wearables)**
 - Sensores que detecten bruxismo, fuerzas masticatorias excesivas o patrones de sueño que influyan en la carga sobre los implantes.
- **Aplicaciones móviles del paciente**
 - Registro de hábitos de higiene, tabaquismo o dieta.
 - Recordatorios de mantenimiento y seguimiento.
- **Plataformas de teleodontología**
 - Control remoto de determinadas fases, revisando fotografías, vídeos o escaneos simplificados enviados por el paciente.

Teóricamente, la información de estos sistemas podría integrarse en el gemelo digital y en los modelos de IA para:

- Ajustar recomendaciones de mantenimiento.
- Identificar precozmente comportamientos que aumenten el riesgo de complicaciones.
- Personalizar la frecuencia de controles y el tipo de intervenciones preventivas. (21–24,38–40)

5.8.3. Automatización, robótica y colaboración humano–máquina

La implantología digital tenderá a un escenario en el que:

- La robótica colaborativa asista al cirujano en procedimientos que requieran alta precisión geométrica.
- Los robots dentales puedan realizar fases concretas de fresado óseo dentro de límites establecidos por la planificación.
- La automatización en laboratorio haga que gran parte de la fabricación protésica sea estandarizada, con intervención humana centrada en la supervisión y el acabado. (17–20,25–30,31–33,38–40,41–44)

Sin embargo, incluso en este contexto avanzado, el rol del implantólogo seguirá siendo esencial en:

- La interpretación global del caso.
- La gestión de imprevistos y complicaciones.
- La comunicación con el paciente y la toma de decisiones éticas.

La colaboración humana–máquina se perfila, así como la relación central de la implantología del futuro.

5.8.4. Sostenibilidad y huella ecológica de la implantología digital

La expansión de tecnologías digitales plantea preguntas sobre su impacto ambiental:

- Consumo energético de servidores, hardware de alto rendimiento y equipos de fabricación.
- Uso de materiales plásticos y resinas en impresión 3D.

- Desecho de componentes electrónicos y obsolescencia programada.

En un enfoque orientado a la sostenibilidad, será necesario:

- Optimizar la vida útil de equipos y software.
- Promover materiales reciclables o de menor impacto ambiental.
- Considerar la huella ecológica global de los flujos digitales frente a los analógicos. (21–24,25–30,38–40)

La implantología digital del futuro deberá equilibrar innovación, calidad clínica y responsabilidad ambiental, integrando indicadores ecológicos en la evaluación global de las tecnologías.

5.8.5. Ética, equidad y brecha digital

Finalmente, todo avance tecnológico trae consigo retos éticos:

- **Equidad en el acceso**
 - Existe el riesgo de que la implantología digital quede reservada a grandes centros urbanos o a pacientes con alto poder adquisitivo.
 - La brecha digital puede traducirse en brecha en salud, perpetuando desigualdades.
- **Transparencia en el uso de IA y datos**
 - Es esencial explicar al paciente cómo se utilizan sus datos y qué papel tiene la IA en las decisiones.
 - La responsabilidad última debe seguir recayendo en el profesional.
- **Protección de datos y anonimización para investigación**
 - La recolección de grandes volúmenes de información clínica para IA y *big data* obliga a establecer protocolos robustos de anonimización y seguridad. (21–24,38–40,41–44)

La implantología digital del futuro no puede comprenderse sólo como un avance técnico; es también un proyecto social que debe cuidar la justicia distributiva, la autonomía del paciente y la protección de la intimidad.

5.9. Recomendaciones para la práctica clínica y líneas de investigación futura

A partir del análisis de casos, comparaciones y tendencias emergentes, pueden derivarse una serie de recomendaciones prácticas para el implantólogo y de líneas prioritarias de investigación en el ámbito de la implantología digital.

5.9.1. Estrategias para la adopción progresiva en la práctica clínica

No todas las clínicas pueden —ni necesitan— adoptar de golpe todo el arsenal tecnológico disponible. Es recomendable plantear una estrategia escalonada:

1. **Primera fase: diagnóstico digital básico**

- Incorporar CBCT (propio o mediante colaboración con centros radiológicos) para casos implantológicos.
- Empezar a trabajar con escaneos intraorales o, al menos, con modelos digitalizados a partir de impresiones físicas.
- Formar al equipo en lectura de CBCT y manejo de modelos 3D. (4,8,11–16,21–24,25–30)

2. Segunda fase: planificación 3D y guías quirúrgicas en casos seleccionados

- Introducir software de planificación para casos unitarios y parciales de moderada complejidad.
- Colaborar con laboratorios o centros especializados para fabricar guías quirúrgicas según la planificación.
- Evaluar sistemáticamente la correlación entre plan y resultado quirúrgico. (11–16,25–30,31–33,34–37)

3. Tercera fase: integración protésica digital (CAD/CAM)

- Incorporar flujos de diseño CAD para coronas y puentes sobre implantes.
- Externalizar inicialmente el fresado o impresión 3D si no se dispone de maquinaria propia.
- Estandarizar protocolos de escaneo con scanbodies y comunicación digital con el laboratorio. (23,24,25–30,29–33,38–40)

4. Cuarta fase: casos complejos y flujos avanzados

- Abordar rehabilitaciones de arcada completa con planificación digital integral y, cuando sea factible, carga inmediata.
- Explorar navegación dinámica o robótica en centros que cuenten con estos recursos.
- Introducir gradualmente herramientas de IA, siempre desde una perspectiva de apoyo al criterio clínico. (17–20,25–30,34–37,38–40,41–44)

Esta adopción progresiva reduce la resistencia al cambio, permite amortizar inversiones y favorece una curva de aprendizaje controlada.

5.9.2. Recomendaciones para la formación continua de implantólogos y equipos

La formación en implantología digital debe ser:

- Estructurada y continua, no limitada a cursos aislados.
- Interdisciplinaria, integrando cirujanos, rehabilitadores, técnicos de laboratorio e incluso ingenieros o especialistas en informática médica. (4,8,11–16,23,24,29–33,38–40)

Se recomienda:

- Participar en programas de posgrado o másteres que incluyan módulos específicos de flujo digital, cirugía guiada y CAD/CAM.
- Asistir a talleres prácticos donde se aborden casos reales y se trabaje con distintos softwares y sistemas.
- Fomentar en las clínicas espacios de formación interna periódica, donde se revisen casos, se compartan experiencias y se actualicen protocolos.

Además, es importante que la formación no se limite a la operatividad técnica, sino que incluya:

- Aspectos de gestión de datos, ciberseguridad y protección de la información.
- Elementos de ética aplicada, especialmente en el uso de IA y en la comunicación con el paciente.

5.9.3. Líneas prioritarias de investigación en implantología digital

Desde una perspectiva académica, se identifican varias líneas de investigación prioritaria:

1. Ensayos clínicos comparativos

- Estudios que comparen flujos convencionales y digitales en términos de:
 - Precisión de la posición de implantes.
 - Supervivencia y éxito a medio y largo plazo.
 - Complicaciones protésicas y biológicas.
 - Satisfacción del paciente y calidad de vida. (4,8,21–24,29–33,38–40)

2. Evaluación de coste–efectividad

- Análisis económicos que consideren:
 - Costes de inversión y mantenimiento de equipos.
 - Reducción de tiempo clínico y de rehacimientos.
 - Valor añadido percibido por el paciente.

3. Validación y transparencia de la IA clínica

- Investigación sobre la fiabilidad de algoritmos de segmentación, diagnóstico y planificación automática.
- Estudios que evalúen el impacto de la IA en la toma de decisiones clínicas y en los resultados. (17–20,38–40,41–44)

4. Desarrollo de gemelos digitales y modelos biomecánicos personalizados

- Creación de modelos que simulen la respuesta ósea y protésica bajo diferentes cargas y condiciones.
- Integración de datos de seguimiento en tiempo real para ajustar los modelos. (38–40,41–44)

5. Nuevos materiales y procesos de fabricación

- Evaluación de la resistencia, biocompatibilidad y comportamiento clínico de materiales diseñados para CAD/CAM e impresión 3D.
- Estudio de superficies de implantes y andamios impresos orientados a la regeneración ósea guiada. (4,8,11–16,21–24,25–30,38–40)

6. Impacto psicosocial y comunicativo de la implantología digital

- Investigación sobre cómo las simulaciones digitales, las herramientas de visualización y la teleodontología influyen en la percepción del tratamiento y en la adherencia al mantenimiento.

5.9.4. Cierre conceptual: hacia una implantología guiada por datos y centrada en la persona

La implantología digital se sitúa en la intersección de biología, ingeniería y ciencia de datos. Los casos clínicos analizados y las tendencias emergentes muestran que las herramientas digitales permiten:

- Planificaciones más precisas y justificadas.
- Cirugías más controladas y previsibles.
- Rehabilitaciones protésicas mejor adaptadas a la anatomía y a la función.
- Procesos de seguimiento más ricos en información. (4,8,11–16,21–24,25–30,34–37,38–40,41–44)

Sin embargo, el núcleo de la implantología sigue siendo el mismo:

- Comprensión profunda de la biología y de la biomecánica.
- Respeto por la individualidad del paciente.
- Responsabilidad ética en la toma de decisiones.

Las tecnologías digitales no sustituyen estos pilares, sino que los potencian cuando se utilizan con criterio, espíritu crítico y orientación a la calidad. El reto para los próximos años será integrar IA, impresión 3D, nuevos materiales y flujos digitales avanzados en una práctica que siga siendo, ante todo, una práctica clínica centrada en la persona, donde la tecnología actúe como un instrumento al servicio de mejores decisiones y mejores resultados para los pacientes.

GLOSARIO TÉCNICO DE IMPLANTOLOGÍA (A-Z)

A

Aditamento protésico: componente que conecta el implante con la prótesis dental.
Asepsia quirúrgica: conjunto de técnicas destinadas a evitar contaminación durante procedimientos clínicos.
Anclaje intraóseo: fijación del implante dentro del hueso alveolar.
Ajuste oclusal: corrección de contactos dentales para equilibrar fuerzas masticatorias.
Alveolo dental: cavidad ósea donde se inserta la raíz del diente o un implante.

B

Biocompatibilidad: capacidad de un material para integrarse con tejidos sin causar rechazo.
Biofilm oral: comunidad bacteriana adherida a superficies dentales o implantarias.
Biomecánica implantaria: estudio de fuerzas y tensiones que actúan sobre implantes dentales.
Biomaterial: sustancia diseñada para interactuar con sistemas biológicos en tratamientos médicos.
Bruxismo: hábito parafuncional de apretar o rechinar los dientes que puede afectar implantes.

C

CAD/CAM dental: tecnología digital para diseñar y fabricar prótesis dentales.
Carga inmediata: colocación de prótesis funcional sobre implantes poco después de la cirugía.
Corona implantosoportada: restauración protésica fijada sobre un implante dental.
Cirugía guiada: procedimiento implantológico planificado digitalmente mediante férulas quirúrgicas.
CBCT: tomografía computarizada de haz cónico utilizada en diagnóstico tridimensional.

D

Densidad ósea: grado de compactación del tejido óseo en una región determinada.
Diagnóstico implantológico: evaluación clínica y radiológica previa a la colocación de implantes.
Diseño implantario: características estructurales del implante dental.
Desbridamiento: eliminación de tejido infectado o contaminado en cirugía.
DICOM: formato digital estándar para imágenes médicas y odontológicas.

E

Escáner intraoral: dispositivo digital que registra modelos tridimensionales de la cavidad oral.
Estabilidad primaria: fijación mecánica inicial del implante en el hueso.
Estabilidad secundaria: fijación biológica resultado de la osteointegración.
Edentulismo: ausencia parcial o total de dientes.
Encía queratinizada: tejido gingival resistente que protege estructuras dentales o implantarias.

F

Férula quirúrgica: guía utilizada para posicionar implantes según planificación digital.
Fresado implantario: preparación del lecho óseo mediante fresas específicas.
Fuerza axial: carga aplicada paralela al eje longitudinal del implante.
Fase inflamatoria: etapa inicial de respuesta biológica tras la colocación del implante.
Fase proliferativa: etapa de regeneración tisular durante la osteointegración.

G

Gingiva periimplantaria: tejido blando que rodea un implante dental.
Guía quirúrgica digital: dispositivo diseñado mediante software para cirugía implantaria.
Grosor gingival: espesor del tejido blando alrededor de dientes o implantes.
Granulación tisular: tejido nuevo formado durante la cicatrización.
Graft óseo: injerto utilizado para regeneración del hueso alveolar.

H

Hueso alveolar: tejido óseo que soporta dientes e implantes.
Hueso cortical: capa externa densa del hueso.
Hueso trabecular: tejido óseo esponjoso interno.
Hemostasia: proceso fisiológico que detiene el sangrado tras una intervención.
Higiene oral: prácticas destinadas a eliminar placa bacteriana.

I

Implante dental: dispositivo de titanio o biomaterial colocado en el hueso para reemplazar dientes perdidos.
Integración ósea: proceso biológico de unión entre implante y hueso.
Inteligencia artificial odontológica: aplicación de algoritmos para diagnóstico y planificación clínica.
Injerto óseo: técnica de regeneración para aumentar volumen de hueso.
Interfase implante-hueso: zona de contacto entre implante y tejido óseo.

J

Junta implante-pilar: conexión entre implante y componente protésico.
Justificación radiológica: criterio clínico para indicar estudios radiográficos.
Jeringa anestésica: instrumento utilizado para administración de anestesia local.
Junta cónica Morse: tipo de conexión interna entre implante y pilar.
Juicio clínico: capacidad del profesional para tomar decisiones terapéuticas.

K

Kinesiología mandibular: estudio del movimiento funcional de la mandíbula.
Keratina gingival: proteína estructural presente en la mucosa oral.
Keratinización gingival: proceso de formación de tejido gingival resistente.
Kinetics ósea: comportamiento del hueso frente a cargas mecánicas.
Kappa bacteriano: parámetro microbiológico en estudios periodontales.

L

Ligamento periodontal: tejido conectivo que une el diente al hueso alveolar.
Lámina dura: capa radiográfica que rodea el alveolo dental.
Longitud implantaria: medida del implante desde cuello hasta ápice.
Ley de Wolff: principio que explica la adaptación del hueso a las cargas.
Lamelar óseo: tipo de hueso organizado en capas estructurales.

M

Microgap: espacio microscópico entre implante y pilar protésico.
Mucositis periimplantaria: inflamación reversible del tejido blando alrededor del implante.
Macrodiseno implantario: forma general del implante dental.
Microtexturización: tratamiento superficial que mejora osteointegración.
Morbilidad quirúrgica: efectos secundarios o complicaciones de una cirugía.

N

Nanoestructura superficial: modificaciones microscópicas de la superficie implantaria.
Necrosis ósea: muerte del tejido óseo por falta de irrigación.
Navegación quirúrgica: tecnología que guía al cirujano durante procedimientos.
Neovascularización: formación de nuevos vasos sanguíneos.
Nódulo inflamatorio: reacción tisular ante infección o trauma.

O

Osteointegración: unión directa entre hueso vivo y superficie del implante.
Osteoblasto: célula responsable de formar tejido óseo.
Osteoclasto: célula que participa en la resorción ósea.
Oclusión dental: relación de contacto entre dientes superiores e inferiores.
Osteotomía: preparación quirúrgica del hueso para colocar implantes.

P

Plataforma implantaria: superficie superior del implante donde se conecta el pilar.
Pilar protésico: componente que conecta implante con la corona.
Periimplantitis: inflamación con pérdida ósea alrededor del implante.
Planificación digital: proceso de diseño virtual de tratamiento implantológico.
Prótesis implantosoportada: restauración dental sostenida por implantes.

Q

Quirófano odontológico: sala equipada para procedimientos quirúrgicos.
Queratina gingival: proteína protectora del tejido gingival.
Quiste odontogénico: lesión patológica relacionada con tejidos dentales.
Quimiotaxis celular: movimiento celular dirigido por señales químicas.
Quirugia oral: especialidad que realiza procedimientos quirúrgicos en cavidad oral.

R

Regeneración ósea guiada: técnica para reconstruir hueso perdido.
Reabsorción ósea: pérdida progresiva del tejido óseo.
Restauración protésica: reemplazo artificial de estructuras dentales.
Radiolucidez: área oscura en radiografías que indica menor densidad ósea.
Remodelación ósea: proceso continuo de formación y resorción del hueso.

S

Scanbody: dispositivo usado para registrar digitalmente la posición del implante.
Superficie SLA: tratamiento implantario mediante arenado y grabado ácido.
Software implantológico: programa digital para planificación de implantes.
Sobrecarga oclusal: exceso de fuerzas sobre implantes o dientes.
Sellado mucoso: barrera biológica de tejidos blandos alrededor del implante.

T

Titanio dental: material biomédico ampliamente usado en implantes dentales.
Tomografía CBCT: imagen tridimensional utilizada en implantología.
Torque de inserción: fuerza aplicada al colocar un implante en el hueso.
Tejido periimplantario: conjunto de estructuras que rodean el implante.
Tratamiento implantológico: proceso clínico de rehabilitación con implantes.

U

Unión implante-pilar: conexión entre implante y componente protésico.
Ultrasonido periodontal: instrumento para eliminar cálculo dental.
Unidad implantaria: conjunto de implante y componentes asociados.
Unión mucosa: contacto entre tejido gingival y superficie del implante.
Ubiquidad bacteriana: presencia generalizada de bacterias en cavidad oral.

V

Volumen óseo: cantidad de hueso disponible para implantes.
Vascularización gingival: red sanguínea que nutre tejidos periimplantarios.
Vector de fuerza: dirección en que actúa una carga sobre el implante.
Validación protésica: verificación clínica del ajuste de la prótesis.
Visualización tridimensional: representación digital de estructuras anatómicas.

W

Wolff, ley de: principio que describe adaptación del hueso a cargas mecánicas.
Workflow digital: flujo de trabajo digital en implantología.
Wear protésico: desgaste de materiales restauradores.
Web gingival: borde del tejido gingival alrededor de dientes.
Wedge óseo: técnica quirúrgica para remodelar hueso.

X

Xerostomía: disminución del flujo salival.
X-ray dental: radiografía utilizada para diagnóstico odontológico.
Xenoinjerto: injerto óseo proveniente de otra especie.
Xilocaína: anestésico local usado en odontología.
Xantoma oral: lesión benigna asociada a depósitos lipídicos.

Y

Yugo protésico: estructura que conecta varios implantes en una prótesis.
Y-implante: diseño implantario con ramificaciones para soporte adicional.
Yield strength: resistencia de un material antes de deformarse permanentemente.
Y-conector protésico: componente utilizado en restauraciones múltiples.
Y-anclaje: sistema de fijación utilizado en algunos implantes experimentales.

Z

Zirconia dental: cerámica de alta resistencia utilizada en prótesis implantarias.
Zona estética: región anterior de la boca con alta demanda estética.
Zócalo alveolar: cavidad ósea que contiene el diente o implante.
Zeta potencial bacteriano: propiedad eléctrica de superficies que influye en adhesión bacteriana.
Zygomatic implants: implantes largos anclados en el hueso cigomático.

AUTORES

OD. LOURDES ELIZABETH MENÉNDEZ OÑA, ESP.



Biografía

Odontóloga, Especialista en Implantología Oral, Diplomado en Estética Dental, Diplomado en Oclusión. Autora de artículos publicados en Revistas Científicas Internacionales Indexadas de Alto Impacto e Impacto Regional. Miembro Investigadora de la Carrera de Odontología extensión Quevedo. Coordinadora de la Carrera de Odontología extensión Quevedo. Docente de la Universidad Regional Autónoma de los Andes.

OD. MARCIA VICTORIA MONTESDEOCA VELÁSQUEZ, ESP.



Biografía

Odontóloga y Especialista en Ortodoncia por la Universidad de Guayaquil, y egresada de la Maestría en Educación Superior de la Universidad Estatal de Milagro (UNEMI). Actualmente se desempeña como docente de tiempo completo en las cátedras de Ortodoncia y Ortopedia de la Universidad Regional Autónoma de los Andes (UNIANDES). Su trayectoria combina la docencia investigativa con la gestión social como Coordinadora del Programa de Vinculación, liderando proyectos que integran la formación académica con la resolución de problemas de salud bucal en la comunidad.

OD. EDISON ANDRÉS FLORES MEJÍA

Biografía

Edison Andrés Flores Mejía, entregado docente investigador, que ayuda a la formación académica e integral de los alumnos de la Uniandes Quevedo en la carrera de Odontología, autor de varios artículos sobre rehabilitación oral que busca brindar a través de esta obra herramientas estratégicas y técnicas para la planificación y éxito de restauraciones definitivas sobre implantes. Cuando no está en docencia disfruta de leer un buen libro, en la ciudad de Quevedo, a sus 35 años.



OD. JAVIER SÁNCHEZ HARO, ESP.

Biografía

Odontólogo y especialista en Prótesis Dental, con una sólida formación académica y clínica orientada a la rehabilitación oral integral, restauradora avanzada y la atención especializada de poblaciones vulnerables como adulto mayor. Su trayectoria profesional se ha caracterizado por un enfoque científico y humanista, basado en evidencia y en criterios funcionales aplicados tanto en la práctica clínica como en la producción académica. Coautor de libros de: Odontología Geriátrica: Cuidando Sonrisas en la Tercera Edad. Carillas Dentales Previo al Estudio y Desarrollo de Mock-Up Aspectos Biomecánicos de Prótesis sobre Implantes



Referencias

1. Abduo J. Rationale for the use of CAD/CAM technology in implant prosthodontics. *Int J Dent.* 2013;2013:768121. doi:10.1155/2013/768121. Available from: <https://doi.org/10.1155/2013/768121>
2. Abduo J. Fit of CAD/CAM implant frameworks: a comprehensive review. *J Adv Prosthodont.* 2014;6(4):377–386. doi:10.4047/jap.2014.6.4.377. Available from: <https://doi.org/10.4047/jap.2014.6.4.377>
3. Abraham CM. A brief historical perspective on dental implants, their surface coatings and treatments. *Open Dent J.* 2014;8:50–55. doi:10.2174/1874210601408010050. Available from: <https://doi.org/10.2174/1874210601408010050>
4. Ahmad I, Al-Harbi F. *3D Printing in Dentistry 2019/2020*. Berlin: Quintessence Publishing; 2019.
5. Aimar A, Palermo A, Innocenti B. The role of 3D printing in medical applications: a state of the art. *J Healthc Eng.* 2019;2019:5340616. doi:10.1155/2019/5340616. Available from: <https://doi.org/10.1155/2019/5340616>
6. Alahmad WZ, Almutairi A, Alfayez S, et al. The impact of robotics and smart implant design on digital dentistry: a scoping review. *Dent J (Basel).* 2025;13(2). doi:10.3390/dj13020025. Available from: <https://doi.org/10.3390/dj13020025>
7. Alfaraj A, Almutairi A, Alfayez S, et al. Race to the moon or the bottom? Applications, performance, and ethical considerations of artificial intelligence in prosthodontics and implant dentistry. *Dent J (Basel).* 2025;13(1):13. doi:10.3390/dj13010013. Available from: <https://doi.org/10.3390/dj13010013>
8. Alqutaibi AY, Algabri RS, Ziada HM, et al. Artificial intelligence models show potential in recognizing dental implant type, predicting implant success, and aiding in implant design. *J Evid Based Dent Pract.* 2023;23(3):101836. doi:10.1016/j.jebdp.2023.101836. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jebdp.2023.101836>
9. Alqutaibi AY, Alghauli MA, Aljohani MH, Zafar MS. Advanced additive manufacturing in implant dentistry: 3D printing technologies, printable materials, current applications and future requirements. *Bioprinting.* 2024;42:e00356. doi:10.1016/j.bprint.2024.e00356. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2024.e00356>
10. Babbush CA, Hahn JA, Krauser JT, et al. *Dental Implants: The Art and Science*. 2nd ed. St Louis (MO): Elsevier; 2010.

11. Bahrami S, et al. Robot-assisted dental implant surgery: procedure, technology and clinical implications—a literature review. *Int J Med Robot.* 2024;20(1):e2589. doi:10.1002/rcs.2589. Available from: <https://doi.org/10.1002/rcs.2589>
12. Bathija A, Papaspyridakos P, Finkelman M, de Souza AB. Accuracy of static computer-aided implant surgery (S-CAIS) using CAD-CAM surgical templates fabricated from different additive manufacturing technologies. *J Prosthet Dent.* 2023;130(5):633–640. doi:10.1016/j.prosdent.2022.10.010. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2022.10.010>
13. Beumer J III, Faulkner RF, Shah KC, Moy PK. *Fundamentals of Implant Dentistry: Prosthodontic Principles*. Hanover Park (IL): Quintessence; 2015.
14. Bornstein MM. Use of cone beam computed tomography in implant dentistry: current concepts, indications and limitations. *Periodontol 2000.* 2017;73(1):7–21. doi:10.1111/prd.12161. Available from: <https://doi.org/10.1111/prd.12161>
15. Buser D, Belser UC, Wismeijer D, editors. *ITI Treatment Guide. Vol. 1: Implant Therapy in the Esthetic Zone*. Berlin: Quintessence; 2007.
16. Buser D, Wismeijer D, Belser UC, editors. *ITI Treatment Guide. Vol. 9: Implant Therapy in the Esthetic Zone*. Berlin: Quintessence; 2019.
17. Canzi P, Magnetto M, Marconi S, Olocco C, Pagella F, Benazzo M. New frontiers and emerging applications of 3D printing in ENT surgery: a systematic review of the literature. *Acta Otorhinolaryngol Ital.* 2018;38(4):286–303. doi:10.14639/0392-100X-1984. Available from: <https://doi.org/10.14639/0392-100X-1984>
18. Chen J, Wang Y, Yang J, et al. Immediate versus early or conventional loading dental implants with fixed prostheses: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled clinical trials. *J Prosthet Dent.* 2019;121(1):92–99. doi:10.1016/j.prosdent.2018.03.003. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2018.03.003>
19. Chen Y, Wei J. Application of 3D printing technology in dentistry: a review. *Polymers (Basel).* 2025;17(7):886. doi:10.3390/polym17070886. Available from: <https://doi.org/10.3390/polym17070886>
20. Chochlidakis KM, Papaspyridakos P, Lazaridou D, Geminiani A, Ercoli C, Papaspyridakos S. Implant-supported fixed complete dental prostheses: a comprehensive review of prosthetic outcomes and complications. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2017;32(2):255–264. doi:10.11607/jomi.5139. Available from: <https://doi.org/10.11607/jomi.5139>

21. Comuzzi L, Tacchino U, Panchal A, Carossa M. Accuracy of dynamic computer-assisted implant surgery for Toronto bridge rehabilitations: a prospective clinical study. *J Prosthodont Res.* 2025;69(3):269–278. doi:10.2186/jpr.23-0075. Available from: <https://doi.org/10.2186/jpr.23-0075>
22. Crafts TD, Ellsperman SE, Wannemuehler TJ, Bellicchi TD, Shipchandler TZ, Mantravadi AV. Three-dimensional printing and its applications in otorhinolaryngology–head and neck surgery. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2017;156(6):999–1010. doi:10.1177/0194599816668372. Available from: <https://doi.org/10.1177/0194599816668372>
23. D'Arienzo LF, Casucci A, Manneh P, Ferrari M. Digital workflow in complete dentures: a narrative review. *J Prosthodont.* 2020;29(1):24–34. doi:10.1111/jopr.13138. Available from: <https://doi.org/10.1111/jopr.13138>
24. Daryakenari G, Ceresoli V, Del Fabbro M. Fully digital workflow in full-arch implant rehabilitation: a descriptive methodological review. *Prosthesis.* 2025;7(4):85. doi:10.3390/prosthesis7040085. Available from: <https://doi.org/10.3390/prosthesis7040085>
25. Dawood A, Marti Marti B, Sauret-Jackson V, Darwood A. 3D printing in dentistry. *Br Dent J.* 2015;219(11):521–529. doi:10.1038/sj.bdj.2015.914. Available from: <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2015.914>
26. Dawson A, Chen S, editors. *The SAC Classification in Implant Dentistry*. Berlin: Quintessence; 2009.
27. Donker VJJ, Raghoobar GM, Vissink A, Meijer HJA, Slater JJRH. A digital surgical and restorative workflow for immediate implant placement and provisionalization in the esthetic zone: a prospective clinical study. *Clin Exp Dent Res.* 2022;8(3):608–617. doi:10.1002/cre2.870. Available from: <https://doi.org/10.1002/cre2.870>
28. Ekram AM, et al. Full digital workflow for prosthetic-driven implant planning: a clinical and technical overview. *Int J Environ Res Public Health.* 2024;21(3). doi:10.3390/ijerph21030345. Available from: <https://doi.org/10.3390/ijerph21030345>
29. Elgarba A, et al. Artificial intelligence serving pre-surgical digital implant planning and prognosis: current evidence and future perspectives. *J Prosthodont.* 2024;33(3). doi:10.1111/jopr.13700. Available from: <https://doi.org/10.1111/jopr.13700>
30. Ellakany P, Abdelbaky M, Abdelhameed A, AbouHashem A. Influence of CAD-CAM manufacturing methods on the accuracy of implant-supported restorations. *J Prosthodont.*

- 2024;Epub ahead of print. doi:10.1111/jopr.13933. Available from: <https://doi.org/10.1111/jopr.13933>
31. Galante JM, Rubio NA, editors. *Digital Dental Implantology: From Treatment Planning to Guided Surgery*. Cham: Springer; 2021. doi:10.1007/978-3-030-65947-9. Available from: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-65947-9>
 32. Garcia J, Yang Z, Mongrain R, Leask RL, Lachapelle K. 3D printing materials and their use in medical education: a review of current technology and trends for the future. *BMJ Simul Technol Enhanc Learn*. 2018;4(1):27–40. doi:10.1136/bmjstel-2017-000234. Available from: <https://doi.org/10.1136/bmjstel-2017-000234>
 33. Garg A. *Implant Dentistry: A Practical Approach*. St Louis (MO): Elsevier; 2010.
 34. Hatcher DC. Operational principles for cone beam computed tomography in dental implant planning. *Implant Dent*. 2012;21(5):446–458. doi:10.1097/ID.0b013e31824885b5. Available from: <https://doi.org/10.1097/ID.0b013e31824885b5>
 35. Jain P, Gupta M, editors. *Digitization in Dentistry: Clinical Applications*. Cham: Springer; 2021. doi:10.1007/978-3-030-65169-5. Available from: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-65169-5>
 36. Jorba-García A, Figueiredo R, González-Barnadas A, Camps-Font O, Valmaseda-Castellón E. Accuracy of dynamic computer-aided implant placement: a systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Investig*. 2021;25(5):2183–2201. doi:10.1007/s00784-021-03833-8. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00784-021-03833-8>
 37. Kafedzhieva A, Vlahova A, Chuchulska B. Digital technologies in implantology: a narrative review. *Bioengineering (Basel)*. 2025;12(9):927. doi:10.3390/bioengineering12090927. Available from: <https://doi.org/10.3390/bioengineering12090927>
 38. Khaohoen A, Yodsanga S, Thanasrisuebwong P, Nemoto R. Accuracy of implant placement with computer-aided static navigation compared to freehand surgery in partially edentulous patients. *BMC Oral Health*. 2024;24(1):383. doi:10.1186/s12903-024-04033-y. Available from: <https://doi.org/10.1186/s12903-024-04033-y>
 39. Khaohoen A, Powcharoen W, Sornsuan T, et al. Accuracy of implant placement with computer-aided static, dynamic, and robot-assisted surgery: a systematic review and meta-analysis of clinical trials. *BMC Oral Health*. 2024;24:463. Available from: <https://doi.org/10.1186/s12903-024-04033-y>
 40. Lee JH, Lee KJ, Choi YJ, et al. Digital impression accuracy for bone-level and tissue-level implants: a randomized clinical trial. *Sci Rep*. 2025;15(1):20524. doi:10.1038/s41598-025-20524-6. Available from: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-20524-6>

41. Logozzo S, Zanetti EM, Franceschini G, Kilpelä A, Mäkinen A. Recent advances in dental optics: 3D intraoral scanners for restorative dentistry. *Opt Lasers Eng.* 2014;54:203–221. doi:10.1016/j.optlaseng.2013.07.017. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.07.017>
42. Low CM, Morris JM, Price DL, Randolph GW, Holsinger FC, Mehta V. Three-dimensional printing: current use in rhinology and endoscopic skull base surgery. *Am J Rhinol Allergy.* 2019;33(6):770–781. doi:10.1177/1945892419866319. Available from: <https://doi.org/10.1177/1945892419866319>
43. Louvrier A, Marty P, Barrabé A, Euvsard E, Chatelain B, Weber E, et al. How useful is 3D printing in maxillofacial surgery? *J Stomatol Oral Maxillofac Surg.* 2017;118(4):206–212. doi:10.1016/j.jormas.2017.07.002. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jormas.2017.07.002>
44. Macrì M, D’Albis V, D’Albis G, Forte M, Capodiferro S, Favia G, et al. The role and applications of artificial intelligence in dental implant planning: a systematic review. *Bioengineering (Basel).* 2024;11(8):778. doi:10.3390/bioengineering11080778. Available from: <https://doi.org/10.3390/bioengineering11080778>
45. Ma J, Jiang N, Lin C, Zhang X, Zhang G. Accuracy of digital implant impressions obtained using intraoral scanners: a systematic review. *Int J Implant Dent.* 2023;9(1):52. doi:10.1186/s40729-023-00517-8. Available from: <https://doi.org/10.1186/s40729-023-00517-8>
46. Mangano F, Veronesi G. Digital versus analog procedures for the fabrication of implant-supported frameworks: a clinical overview. *J Investig Clin Dent.* 2016;7(1):38–45. doi:10.1111/jicd.12136. Available from: <https://doi.org/10.1111/jicd.12136>
47. Mangano FG, Gandolfi A, Luongo G, Logozzo S. Intraoral scanners in dentistry: a review of the current literature. *BMC Oral Health.* 2017;17(1):149. doi:10.1186/s12903-017-0442-x. Available from: <https://doi.org/10.1186/s12903-017-0442-x>
48. Marlière DAA, Demétrio MS, Picinini LS, Duque Netto H. Accuracy of computer-guided surgery for dental implant placement in fully edentulous patients: a systematic review. *J Prosthet Dent.* 2018;120(6):699–709. doi:10.1016/j.prosdent.2017.12.011. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2017.12.011>
49. Márquez-Bautista N, García-Gil I, De la Rosa-Sánchez G, Pradiés G. Accuracy of different systems of guided implant surgery: an in-vitro study. *Appl Sci (Basel).* 2024;14(24):11479. doi:10.3390/app142411479. Available from: <https://doi.org/10.3390/app142411479>
50. Misch CE. *Contemporary Implant Dentistry*. 3rd ed. St Louis (MO): Mosby Elsevier; 2008.

51. Misch CE. *Dental Implant Prosthetics*. 2nd ed. St Louis (MO): Elsevier; 2015.
52. Moraschini V, Uzeda MG, Burity HAF, Scoda LF, Calasans-Maia MD. Accuracy of artificial intelligence in implant dentistry: a scoping review with systematic evidence mapping. *J Prosthet Dent*. 2024;Epub ahead of print. doi:10.1016/j.prosdent.2024.05.030. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.05.030>
53. Morton D, Gallucci GO, Lin WS, Pjetursson B, et al. The use of digital technology in implant dentistry: a narrative review. *J Prosthodont*. 2019;28(1):44–52. doi:10.1111/jopr.12900. Available from: <https://doi.org/10.1111/jopr.12900>
54. Neugebauer J, et al. Clinical guideline for digital workflow in implant dentistry. *Int J Comput Dent*. 2024;27(1):1–20.
55. Nova Authors Group. *Digital Implant Planning and Guided Implant Surgery*. New York: Nova Science Publishers; 2023.
56. Nulty AB, Kelly C, Ambridge O, Ambridge M, Ferguson R, Hoffer A. In vitro comparison of trueness and precision of an AI-driven real-time library matching protocol with irregular-geometry scan bodies for full-arch implant scanning. *Dent J (Basel)*. 2025;13(11):533. doi:10.3390/dj13110533. Available from: <https://doi.org/10.3390/dj13110533>
57. Nulty AB, Kelly C, Ambridge O, et al. An overview of digital workflows for precision implant dentistry. *J Calif Dent Assoc*. 2022;50(9):527–539.
58. Obradović-Đuričić K, Medić V, Dodić S, et al. Protocols in classification of partially edentulous patients. *Srp Arb Celok Lek*. 2018;146(3–4):214–220. doi:10.2298/SARH180403048O. Available from: <https://doi.org/10.2298/SARH180403048O>
59. Pardal-Peláez B, Flores-Fraile J, Pardal Refoyo JL, Montero J. Implant loss and crestal bone loss in early loading versus delayed and immediate loading in edentulous mandibles: a systematic review and meta-analysis. *J Clin Exp Dent*. 2020;12(2):e193–e201. doi:10.4317/jced.56726. Available from: <https://doi.org/10.4317/jced.56726>
60. Parithimarkalaigan S, Padmanabhan TV. Osseointegration: an update. *J Indian Prosthodont Soc*. 2013;13(1):2–6. doi:10.1007/s13191-013-0252-z. Available from: <https://doi.org/10.1007/s13191-013-0252-z>
61. Pesce P, Guarnieri R, Mariani P, Menini M. Accuracy of full-arch intraoral scans versus conventional impressions: a systematic review and meta-analysis. *J Clin Med*. 2024;14(1):71. doi:10.3390/jcm14010071. Available from: <https://doi.org/10.3390/jcm14010071>
62. Pirooz P, et al. Digital implant placement accuracy: a clinical study on a fully-guided *flapless* single-unit immediate-loading protocol. *Maxillofac Plast Reconstr Surg*. 2023;45(1):19.

doi:10.1186/s40902-023-00387-5. Available from: <https://doi.org/10.1186/s40902-023-00387-5>

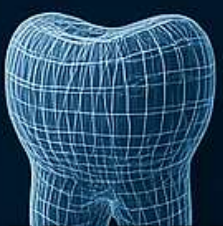
63. Pisla D, Vaida C, et al. Accuracy of navigation and robot-assisted systems for dental implant placement: a systematic review. *Dent J (Basel)*. 2025;13(11):537. doi:10.3390/dj13110537. Available from: <https://doi.org/10.3390/dj13110537>
64. Piscopo N, et al. Full digital workflow for prosthetic full-arch immediate loading using multi-unit abutments: case series. *Prosthesis*. 2022;4(4). doi:10.3390/prosthesis4040045. Available from: <https://doi.org/10.3390/prosthesis4040045>
65. Pradies G, Morón-Conejo B, Martínez-Rus F, Salido MP, Berrendero S. Current applications of 3D printing in dental implantology: a scoping review mapping the evidence. *Clin Oral Implants Res*. 2024;35(8):1011–1032. doi:10.1111/clr.14198. Available from: <https://doi.org/10.1111/clr.14198>
66. Prasher P, Tuteja A, Amin F, Sopaj R, Sharaf Eddin H, et al. Advancing precision: The role of digital workflows in modern implant dentistry. *Bioinformation*. 2025;21(8):2490–2495. doi:10.6026/973206300212490. Available from: <https://doi.org/10.6026/973206300212490>
67. Ravipati S, et al. Accuracy of dental implant placement using robotics: a systematic review. *Clin Oral Investig*. 2024;28(3). doi:10.1007/s00784-024-05510-3. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00784-024-05510-3>
68. Resnik RR. *Misch's Contemporary Implant Dentistry*. 4th ed. St Louis (MO): Elsevier; 2017.
69. Revilla-León M, Gómez-Polo M, Vyas S, Barmak BA, Gallucci GO, Att W, et al. Artificial intelligence applications in implant dentistry: a systematic review. *J Prosthet Dent*. 2023;129(2):293–300. doi:10.1016/j.prosdent.2021.05.008. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.05.008>
70. Rokaya D, et al. Artificial intelligence in dentistry and dental biomaterials: a review. *Front Dent Med*. 2024;5:1525505. doi:10.3389/fdmed.2024.1525505. Available from: <https://doi.org/10.3389/fdmed.2024.1525505>
71. Rane AK, El-Refay AS, Abdelaziz MS. The accuracy of digital impression with different intraoral scanners on maxillary All-on-Four implants: an in vitro study. *BMC Res Notes*. 2025;18(1):xx. doi:10.1186/s13104-025-07235-x. Available from: <https://bmcrsnotes.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13104-025-07235-x>
72. Sankar KM, et al. Dental implant placement accuracy with robotic surgery: a randomized controlled pilot trial. *Clin Oral Implants Res*. 2025;36(1). doi:10.1111/clr.14320. Available from: <https://doi.org/10.1111/clr.14320>

73. Sadowsky SJ, Bedrossian E. Evidence-based criteria for differential treatment planning of implant restorations for the partially edentulous patient. *J Prosthodont*. 2013;22(4):276–288. doi:10.1111/jopr.12014. Available from: <https://doi.org/10.1111/jopr.12014>
74. Sclar AG. *Soft Tissue and Esthetic Considerations in Implant Therapy*. Chicago: Quintessence; 2003.
75. Senderovich N, Shah S, Ow TJ, Lobo R, Fialkov J, Kamil R. Assessment of *Staphylococcus aureus* growth on biocompatible 3D-printed materials. *3D Print Med*. 2023;9(1):30. doi:10.1186/s41205-023-00195-7. Available from: <https://doi.org/10.1186/s41205-023-00195-7>
76. Shadid RM, Wahsh MM, Al-Sabbagh A, Khattab NM. How much is stable the bonding of CAD-CAM implant-supported all-ceramic restorations after 3 years of clinical service? *Clin Cosmet Investig Dent*. 2025;Epub ahead of print. doi:10.2147/CCIDE.S510760. Available from: <https://doi.org/10.2147/CCIDE.S510760>
77. Shi Y, Wang J, Ma C, Shen J, Dong X, Lin D. A systematic review of the accuracy of digital surgical guides for dental implantation. *Int J Implant Dent*. 2023;9(1):38. doi:10.1186/s40729-023-00507-w. Available from: <https://doi.org/10.1186/s40729-023-00507-w>
78. Singh C. *Guided Implant Surgery*. New York: Barnes & Noble Press; 2024.
79. Sriwastwa A, Ravi P, Emmert A, Bourauel C, Keilig L. Generative AI for medical 3D printing: a comparison of ChatGPT outputs to reference standard education. *3D Print Med*. 2023;9(1):21. doi:10.1186/s41205-023-00186-8. Available from: <https://doi.org/10.1186/s41205-023-00186-8>
80. Sun Y, Lyu P, Wang J, et al. Accuracy of a chairside, fused deposition modeling three-dimensional-printed single-tooth surgical guide for implant placement: a randomized controlled clinical trial. *Clin Oral Implants Res*. 2019;30(10):955–964. doi:10.1111/clr.13981. Available from: <https://doi.org/10.1111/clr.13981>
81. Tahmaseb A, Wu V, Wismeijer D, Coucke W, De Bruyn H. Accuracy of static computer-aided implant surgery: a systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Implants Res*. 2018;29(Suppl 16):416–435. doi:10.1111/clr.13346. Available from: <https://doi.org/10.1111/clr.13346>
82. Tyndall DA, Price JB, Tetradis S, Ganz SD, Hildebolt C, Scarfe WC, et al. Position statement of the American Academy of Oral and Maxillofacial Radiology on selection criteria for the use of radiology in dental implantology with emphasis on cone beam computed tomography. *J Am Dent Assoc*. 2012;143(8):899–902.

doi:10.14219/jada.archive.2012.0031. Available from:

<https://doi.org/10.14219/jada.archive.2012.0031>

83. Van Assche N, van Steenberghe D, Quirynen M, Jacobs R. Accuracy assessment of computer-assisted *flapless* implant placement in partial edentulism. *J Clin Periodontol*. 2010;37(4):398–403. doi:10.1111/j.1600-051X.2010.01545.x. Available from: <https://doi.org/10.1111/j.1600-051X.2010.01545.x>
84. Vázquez-Sebrango G, López-Jornet P, Borrelli E, de Medeiros R, Gómez-Moreno G. The role of artificial intelligence in implant dentistry: a systematic review. *Int J Oral Maxillofac Surg*. 2025;Epub ahead of print. doi:10.1016/j.ijom.2025.04.005. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2025.04.005>
85. Wei SM, Li J, Qiao SC, Shi JY, Tonetti MS, Lai HC. Accuracy of dynamic navigation in implant surgery: a systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Implants Res*. 2021;32(3):383–393. doi:10.1111/clr.13719. Available from: <https://doi.org/10.1111/clr.13719>
86. Wismeijer D, Barter S, Donos N, editors. *Digital Workflows in Implant Dentistry. ITI Treatment Guide, Vol. 11*. Berlin: Quintessence Publishing; 2019.
87. Wu XY, Shi JY, Qiao SC, Tonetti MS, Lai HC. Accuracy of robotic surgery for dental implant placement: a systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Implants Res*. 2024;35(4):598–608. doi:10.1111/clr.14255. Available from: <https://doi.org/10.1111/clr.14255>
88. Yan Q, Dong H, Su J, Han J, Song B, Wei Q, et al. A review of 3D printing technology for medical applications. *Engineering*. 2018;4(5):729–742. doi:10.1016/j.eng.2018.07.021. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.07.021>
89. Yeung M, Abdulmajeed A, Carrico CK, Deeb GR, Bencharit S. Accuracy and precision of 3D-printed implant surgical guides with different implant systems: an in vitro study. *J Prosthet Dent*. 2020;123(6):821–828. doi:10.1016/j.prosdent.2019.05.027. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2019.05.027>
90. Ying Y, et al. Deep learning in the overall process of implant treatment planning and prognosis. *Int J Environ Res Public Health*. 2024;21(1). doi:10.3390/ijerph21010012. Available from: <https://doi.org/10.3390/ijerph21010012>
91. Yu H, Wu D, Yuan P, Li J, Yang J. Dynamic computer-assisted implant surgery: accuracy and clinical outcomes – a systematic review. *J Prosthet Dent*. 2023;130(6):1049–1058. doi:10.1016/j.prosdent.2023.06.019. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2023.06.019>



TENDENCIAS FUTURAS EN IMPLANTOLOGÍA DIGITAL

