

INSTITUTO UNIVERSITÁRIO EGAS MONIZ

MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA DENTÁRIA

**COMPARAÇÃO ENTRE A EFICÁCIA DOS MÉTODOS
TRADICIONAIS E OS MÉTODOS ASSISTIDOS POR IA NO
DIAGNÓSTICO ORTODÔNTICO**

Trabalho submetido por
Gatien Ayuso--Watier
para a obtenção do grau de Mestre em Medicina Dentaria

julho de 2026

INSTITUTO UNIVERSITÁRIO EGAS MONIZ

MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA DENTÁRIA

**COMPARAÇÃO ENTRE A EFICÁCIA DOS MÉTODOS
TRADICIONAIS E OS MÉTODOS ASSISTIDOS POR IA NO
DIAGNÓSTICO ORTODÔNTICO**

Trabalho submetido por

Gatien Ayuso--Watier

para a obtenção do grau de Mestre em Medicina Dentaria

Trabalho orientado por

Prof. Doutora Teresa Sobral Costa

julho de 2026

Agradecimentos

Gostaria de agradecer à minha orientadora de tese, a Professora Teresa Sobral Costa, por me ter dado a oportunidade de abordar o tema que me era tão caro. Obrigado por todos os conselhos, as correções que me foram dadas durante esta redação, assim como a paciência durante a escrita da minha tese.

Obrigado a todo o corpo docente por todo o conhecimento transmitido ao longo destes 5 longos anos. Obrigado à faculdade Egas Moniz que me permitiu crescer, aprender mais sobre mim mesmo e realizar o meu sonho.

Merci à mes parents de m'avoir permis de faire les études de mon choix et de m'avoir accompagné et soutenu pendant ces 6 années de travail. Je vous remercie du fond du cœur.

Et enfin, merci à Thomas d'avoir été présent depuis le début du cursus, de m'avoir pris sous son aile et soutenu chaque fois que j'en ai eu besoin. Cette thèse n'aurait jamais été la même sans lui

Declaração de Honra

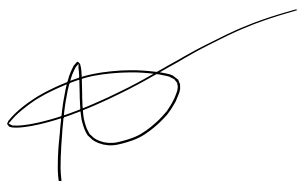
Código | IMP-EM-EI-111_01

Declaro, por minha honra, que o presente trabalho académico é original e foi elaborado por mim próprio, não se tendo recorrido a quaisquer outras fontes, para além das indicadas, usadas, adotadas literalmente ou adaptados a partir dos seus originais (em fontes impressas, não impressas ou na internet) e encontram-se adequados, identificados e citados, com observância das convenções do trabalho académico em vigor.

Mais declaro que esta Trabalho de Projeto final (COMPARAÇÃO ENTRE A EFICÁCIA DOS MÉTODOS TRADICIONAIS E OS MÉTODOS ASSISTIDOS POR IA NO DIAGNÓSTICO ORTODÔNTICO.) não foi apresentada, para efeitos de avaliação, a qualquer outra entidade ou instituição, para além da(s) diretamente envolvida(s) na sua elaboração, e que os conteúdos das versões impressa e eletrónica são inteiramente coincidentes.

Declaro, igualmente, encontrar-me ciente de que a inclusão, neste texto, de qualquer falsa declaração terá consequências legais.

Data: 12/06/2026

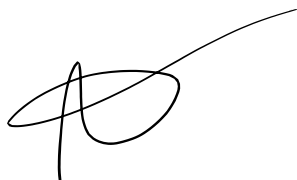


Declaração Conflito de Interesses (DCI)

Código | IMP-EM-EI-110_01

Eu Gatien Ayuso--Watier, referente a Trabalho de Projeto final (COMPARAÇÃO ENTRE A EFICÁCIA DOS MÉTODOS TRADICIONAIS E OS MÉTODOS ASSISTIDOS POR IA NO DIAGNÓSTICO ORTODÔNTICO.) declaro que não possuo conflitos de interesse de ordem pessoal, comercial, académica, político ou financeiro.

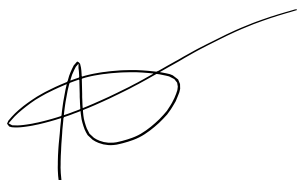
Data: 12/06/2026



Declaração de Financiamento

Código | IMP-EM-EI-113_01

Eu Gatien Ayuso—Watier, referente a Trabalho de Projeto final (COMPARAÇÃO ENTRE A EFICÁCIA DOS MÉTODOS TRADICIONAIS E OS MÉTODOS ASSISTIDOS POR IA NO DIAGNÓSTICO ORTODÔNTICO) declaro que o meu trabalho não se encontra financiado.

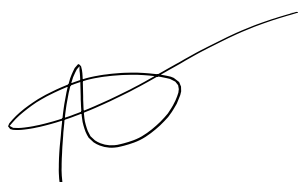


Declaração de Ética e Registo

Código | IMP-EM-EI-112_01

Eu Gatien Ayuso—Watier, referente a Trabalho de Projeto final (COMPARAÇÃO ENTRE A EFICÁCIA DOS MÉTODOS TRADICIONAIS E OS MÉTODOS ASSISTIDOS POR IA NO DIAGNÓSTICO ORTODÔNTICO.) declaro que o meu trabalho se não se encontra aprovado pela Comissão de ética.

Data: 12/06/2026



Declaração de Disponibilidade de Dados

Código | IMP-EM-EI-150

A presente Declaração de Disponibilidade de Dados reflete o compromisso do Instituto Universitário Egas Moniz em promover a transparência, a reprodutibilidade científica e o acesso aberto aos dados gerados no âmbito dos projetos a decorrer nesta IES, em conformidade com os princípios éticos e legais aplicáveis e com os princípios FAIR. Esta declaração estabelece as condições e as diretrizes para o acesso, o compartilhamento e a reutilização dos dados, garantindo que sejam utilizados de forma responsável e em benefício da comunidade científica e da sociedade.

A seguinte tabela apresenta diferentes opções de partilha de dados, incluindo exemplos de formatos e níveis de acessibilidade. Deverá selecionar a(s) opção(ões) que melhor se adequa(m) ao seu projeto, assegurando o cumprimento das diretrizes éticas e científicas aplicáveis.

Tabela 1: Exemplos de declarações de disponibilidade de dados. Onde aparece [nome do repositório, por exemplo, "pure"] deve ser preenchido

Disponibilidade de dados	Modelo de declaração de disponibilidade de dados	Política de partilha	Assinale com "x"
Dados disponíveis num repositório público que emite conjuntos de dados com DOIs	Os dados que apoiam as conclusões deste estudo estão disponíveis em [nome do repositório, por exemplo, "pure"] em http://doi.org/[doi] , número de referência [número de referência].	Partilha geral sem pedido	
Dados abertamente disponíveis num repositório público que não emite DOIs	Os dados que apoiam as conclusões deste estudo estão disponíveis em [nome do repositório] em [URL], número de referência [número de referência].	Partilha geral sem pedido	

Disponibilidade de dados	Modelo de declaração de disponibilidade de dados	Política de partilha	Assinale com “x”
Dados derivados de recursos do domínio público	Os dados que apoiam as conclusões deste estudo estão disponíveis em [nome do repositório] em [URL/DOI], número de referência [número de referência]. Estes dados foram obtidos a partir dos seguintes recursos disponíveis no domínio público: [listar recursos e URLs]	Partilha geral sem pedido	
Dados disponíveis no artigo ou nos seus materiais suplementares	Os autores confirmam que os dados que suportam as conclusões deste estudo estão disponíveis no artigo [e/ou] nos seus materiais suplementares.	Básico, partilhar a pedido	
Dados gerados numa instalação central de grande escala, disponíveis mediante pedido	Os dados em bruto foram gerados em [nome da instalação]. Os dados derivados que suportam as conclusões deste estudo estão disponíveis junto do autor correspondente [iniciais], mediante pedido.	Básico, partilhar a pedido	
Embargo dos dados devido a restrições comerciais	Os dados que suportam os resultados estarão disponíveis em [nome do repositório] em [URL / ligação DOI] após um embargo de [6 meses] a partir da data de publicação para permitir a comercialização dos resultados da investigação.	Básico, Partilhar a pedido	
Dados disponíveis a pedido devido a restrições de privacidade/éticas	Os dados que sustentam as conclusões deste estudo estão disponíveis mediante pedido ao autor correspondente, [iniciais]. Os dados não estão disponíveis ao público devido a [restrições, por exemplo, o facto de conterem informações que podem comprometer a privacidade dos participantes na investigação].	Básico, Partilhar a pedido	

Declaração de Disponibilidade de Dados

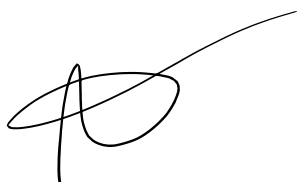
Código | IMP-EM-EI-150

Disponibilidade de dados	Modelo de declaração de disponibilidade de dados	Política de partilha	Assinale com “x”
Dados sujeitos a restrições de terceiros	Os dados que suportam as conclusões deste estudo estão disponíveis [junto de] [terceiros]. Aplicam-se restrições à disponibilidade destes dados, que foram utilizados sob licença para este estudo. Os dados estão disponíveis [através dos autores / no URL] com a permissão de [terceiros].	Básico, Partilhar a pedido	
Dados disponíveis a pedido dos autores	Os dados que suportam as conclusões deste estudo estão disponíveis junto do autor correspondente, [iniciais do autor], mediante pedido razoável.	Básico, Partilhar a pedido	
Partilha de dados não aplicável - não foram gerados novos dados	A partilha de dados não é aplicável a este artigo, uma vez que não foram criados ou analisados novos dados neste estudo.	-	
Dados não digitais disponíveis	Os dados não digitais que suportam este estudo são conservados em [adicionar local].	Básicos	
Dados não disponíveis devido a restrições [éticas/legais/comerciais]	Devido à natureza da investigação, os dados de apoio [éticos/legais/comerciais] não estão disponíveis.	-	
Dados não disponíveis - consentimento do participante	Os participantes neste estudo não deram consentimento escrito para que os seus dados fossem partilhados publicamente, pelo que,	-	

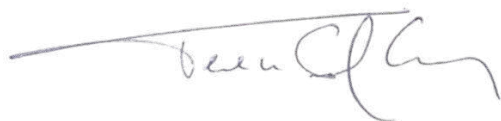
Disponibilidade de dados	Modelo de declaração de disponibilidade de dados	Política de partilha	Assinale com “x”
	devido à natureza sensível da investigação, os dados de apoio não estão disponíveis.		

O Orientando: Gatien ayuso–Watier

Data: 12/06/2026



O Orientador: Teresa Luisa dos Santos Sobral Costa Data: 15/06/2026



Resumo :

A Inteligência Artificial (IA) tem assumido um papel crescente na Medicina Dentária, particularmente na Ortodontia, onde tem sido aplicada no apoio ao diagnóstico, ao planeamento terapêutico e à análise de imagens. O presente trabalho teve como objetivo comparar os métodos tradicionais de diagnóstico ortodôntico com os métodos assistidos por IA, analisando a sua precisão, reprodutibilidade, eficiência clínica e implicações éticas.

Para a realização deste trabalho, foi efetuada uma revisão narrativa da literatura científica sobre os métodos convencionais de diagnóstico ortodôntico e as aplicações da IA nesta área. Foram analisadas as potencialidades e limitações de ambas as abordagens, bem como o impacto da sua utilização na prática clínica contemporânea.

A evidência científica disponível sugere que os sistemas de IA apresentam um elevado potencial para otimizar o processo diagnóstico, permitindo uma análise mais rápida e consistente dos exames imagiológicos e contribuindo para a padronização de determinadas tarefas clínicas. No entanto, a sua implementação continua a enfrentar desafios relacionados com a validação clínica dos algoritmos, a variabilidade biológica dos pacientes, a transparência dos processos de decisão e as questões éticas e legais associadas à sua utilização.

Conclui-se que a IA representa uma ferramenta promissora para o diagnóstico ortodôntico, podendo melhorar a eficiência e a precisão dos procedimentos clínicos. Contudo, a sua utilização deve ocorrer de forma complementar ao raciocínio clínico do médico dentista, preservando a individualização do tratamento, a responsabilidade profissional e os princípios éticos fundamentais da prática ortodôntica.

Palavras-chave: Inteligência Artificial ; Ortodontia ; Diagnóstico Ortodôntico ; Precisão Diagnóstica ; Ética.

Abstract

Artificial Intelligence (AI) has assumed an increasingly important role in Dentistry, particularly in Orthodontics, where it has been applied to support diagnosis, treatment planning, and image analysis. The aim of the present study was to compare traditional orthodontic diagnostic methods with AI-assisted approaches, analyzing their accuracy, reproducibility, clinical efficiency, and ethical implications.

To carry out this study, a narrative review of the scientific literature was conducted on conventional orthodontic diagnostic methods and the applications of AI in this field. The strengths and limitations of both approaches were analyzed, as well as the impact of their use on contemporary clinical practice.

The available scientific evidence suggests that AI systems have significant potential to optimize the diagnostic process by enabling faster and more consistent analysis of imaging examinations and contributing to the standardization of certain clinical tasks. However, their implementation continues to face challenges related to the clinical validation of algorithms, patients' biological variability, the transparency of decision-making processes, and the ethical and legal issues associated with their use.

It can be concluded that AI represents a promising tool for orthodontic diagnosis and may improve the efficiency and accuracy of clinical procedures. Nevertheless, its use should complement the clinical reasoning of the dentist, while preserving treatment individualization, professional responsibility, and the fundamental ethical principles of orthodontic practice.

Keywords: Artificial Intelligence; Orthodontics; Orthodontic Diagnosis; Diagnostic Accuracy; Ethics.

Résumé

L'intelligence artificielle (IA) occupe une place de plus en plus importante en médecine dentaire, en particulier en orthodontie, où elle est utilisée pour soutenir le diagnostic, la planification thérapeutique et l'analyse d'images. Le présent travail avait pour objectif de comparer les méthodes traditionnelles de diagnostic orthodontique aux approches assistées par l'IA, en analysant leur précision, leur reproductibilité, leur efficacité clinique ainsi que leurs implications éthiques.

Pour réaliser cette étude, une revue narrative de la littérature scientifique a été menée sur les méthodes conventionnelles de diagnostic orthodontique et les applications de l'IA dans ce domaine. Les avantages et les limites de ces deux approches ont été analysés, ainsi que l'impact de leur utilisation sur la pratique clinique contemporaine.

Les données scientifiques disponibles suggèrent que les systèmes d'IA présentent un potentiel considérable pour optimiser le processus diagnostique, en permettant une analyse plus rapide et plus cohérente des examens d'imagerie et en contribuant à la standardisation de certaines tâches cliniques. Toutefois, leur mise en œuvre continue de se heurter à plusieurs défis, notamment la validation clinique des algorithmes, la variabilité biologique des patients, la transparence des processus décisionnels ainsi que les questions éthiques et juridiques liées à leur utilisation.

Il peut être conclu que l'IA représente un outil prometteur pour le diagnostic orthodontique et qu'elle est susceptible d'améliorer l'efficacité et la précision des procédures cliniques. Néanmoins, son utilisation doit demeurer complémentaire au raisonnement clinique du chirurgien-dentiste, tout en préservant l'individualisation du traitement, la responsabilité professionnelle et les principes éthiques fondamentaux de la pratique orthodontique.

Mots-clés : Intelligence artificielle ; Orthodontie ; Diagnostic orthodontique ; Précision diagnostique ; Éthique.

Índice

Resumo :	1
Índice de figuras	9
Lista de abreviaturas	11
Introdução	13
I. Diagnóstico Ortodôntico : Métodos Convencionais e Aplicações da Inteligência Artificial	15
1.1 Métodos Convencionais de Diagnóstico Ortodôntico	15
1.1.1 Fluxo de Trabalho Convencional	15
1.1.2 Limitações da Imagiologia Bidimensional	16
1.1.3 Variabilidade Interobservador e Intraobservador	17
1.1.4 Limitações Operacionais e Temporais	18
1.2 Inteligência Artificial em Ortodontia	19
1.2.1 Conceitos Fundamentais de Inteligência Artificial	20
1.2.2 Principais Aplicações na Ortodontia	21
1.2.3 Inteligência Artificial como Ferramenta de Apoio ao Diagnóstico	24
II. Análise Comparativa entre Métodos Convencionais e Métodos Assistidos por Inteligência Artificial	29
2.1 Precisão Diagnóstica e Reprodutibilidade	29
2.1.1 Desempenho dos Sistemas de Cefalometria Automatizada	29
2.1.2 Limitações da Segmentação Automática e da Detecção de Patologias	31
2.2 Eficiência Clínica e Impacto no Planeamento Terapêutico	32
2.2.1 Redução do Tempo de Trabalho Clínico	32
2.2.2 Simulação Preditiva e Comunicação com o Doente	34
2.3 Limitações Tecnológicas e Considerações Éticas	35
2.3.1 Enviesamento dos Dados de Treino e Representatividade Populacional	36
2.3.2 Opacidade Algorítmica e Interpretabilidade dos Sistemas	37
2.3.3 Limitações Biológicas dos Modelos Preditivos	39
III. Implicações Éticas, Jurídicas e Perspetivas Futuras da Inteligência Artificial em Ortodontia	41

3.1 Responsabilidade Profissional e Enquadramento Jurídico	41
3.1.1 Responsabilidade Associada à Utilização da Inteligência Artificial.....	41
3.1.2 O Conceito Human-in-the-Loop (HITL).....	42
3.1.3 Enviesamento de Automação e Dependência Tecnológica	43
3.2 Relação Médico-Dentista-Doente na Era Digital	44
3.2.1 Inteligência Artificial como Ferramenta de Comunicação Clínica.....	45
3.2.2 Confiança, Transparência e Tomada de Decisão Partilhada.....	46
3.2.3 Consentimento Informado e Direito à Informação	47
3.3 O Futuro da Prática Ortodôntica	47
3.3.1 Evolução do Papel do Ortodontista.....	48
3.3.2 O Conceito de Inteligência Aumentada.....	49
3.3.3 Desafios Formativos e Educacionais	50
Conclusão	53
Bibliografia	57

Índice de figuras

Figura 1 : Sobreposição entre segmentação de referência (ground truth) e segmentação automatizada por modelo de deep learning. Adaptado de Shaheen et al. (2021)	22
Figura 2 : Avaliação volumétrica dos tecidos moles faciais pós-ortodônticos através de mapa de distâncias gerado por rede adversarial generativa condicional (cGAN). Adaptado de Park et al. (2022)	24
Figura 3 : Identificação automatizada de dente supranumerário incluso em radiografia panorâmica por rede neuronal convolucional. Adaptado de Kuwada et al. (2020).....	27
Figura 4 : Exemplo de Inteligência Artificial Explicável (XAI) através de mapas de ativação (saliency maps). Adaptado de Ma et al. (2022).....	39

Lista de abreviaturas

2D : Bidimensional

3D : Tridimensional

ANN : Artificial Neural Networks (Redes Neurais Artificiais)

CBCT : Cone Beam Computed Tomography

cGAN : Conditional Generative Adversarial Network (Rede Gerativa Adversarial Condicional)

CNN : Convolutional Neural Network (Rede Neuronal Convolucional)

DSD : Digital Smile Design

HITL : Human-in-the-loop

IA : Inteligência Artificial

VTO : Visual Treatment Objective

XAI : Explainable Artificial Intelligence (Inteligência Artificial Explicável)

Introdução

A ortodontia é uma disciplina visual e métrica. Atualmente, o desenvolvimento da imagiologia tridimensional e dos scanners digitais originou um aumento exponencial do volume de dados clínicos disponíveis, o que representa um desafio crescente para a capacidade de análise e integração de informação por parte do clínico.

Historicamente, o diagnóstico tradicional (manual) tem sido considerado o método de referência clínica (*gold standard*) na profissão. No entanto, a realidade do consultório evidencia rapidamente os limites desta abordagem: o processo diagnóstico exige um investimento temporal significativo e implica um elevado esforço cognitivo por parte do clínico. Adicionalmente, este modelo está profundamente sujeito à subjetividade humana. A interpretação clínica encontra-se sujeita à fadiga cognitiva e à variabilidade observacional, o que cria uma forte variabilidade entre diferentes clínicos, e até num único profissional em momentos diferentes.

A Promessa da Inteligência Artificial: Automatização, rapidez e objetividade.

Face a estas limitações, a inteligência artificial surge com uma promessa muito clara: automatização, rapidez e objetividade. Na prática, isto traduz-se pela capacidade dos algoritmos executarem as etapas mais morosas e repetitivas do diagnóstico.

Tarefas que antes exigiam longos minutos de concentração, como a marcação manual de pontos cefalométricos, a segmentação de tecidos moles e ósseos ou o cálculo de volumes das vias aéreas, são agora executadas em poucos segundos.

Além desta drástica poupança de tempo, a tecnologia procura reduzir determinados enviesamentos associados à observação humana e à flutuação da atenção. Ao contrário da avaliação humana, os algoritmos aplicam consistentemente os mesmos critérios matemáticos em cada análise, promovendo maior padronização e reprodutibilidade dos resultados.

Deste modo, a inteligência artificial visa libertar o clínico do trabalho puramente mecânico, permitindo-lhe dedicar maior atenção ao raciocínio terapêutico, à tomada de decisão clínica e à relação com o paciente.

O objetivo final desta transição tecnológica é transformar um processo clínico frequentemente dependente da interpretação subjetiva numa decisão padronizada, altamente reprodutível e baseada em dados concretos.

Poderá ser a IA uma ferramenta fiável capaz de substituir o olho humano, ou será apenas uma ajuda logística que introduz novos enviesamentos?

Mas esta revolução não pode ser aceite de forma acrítica. Levanta uma problemática central que guiará esta tese: será a inteligência artificial uma ferramenta de diagnóstico verdadeiramente fiável, capaz de reduzir a subjetividade humana, ou será apenas uma simples ajuda logística que corre o risco de introduzir novos enviesamentos na prática quotidiana.

I. Diagnóstico Ortodôntico : Métodos Convencionais e Aplicações da Inteligência Artificial

1.1 Métodos Convencionais de Diagnóstico Ortodôntico

Hoje em dia, a ortodontia moderna enfrenta as limitações físicas e cognitivas do seu tradicional *gold standard*. Um diagnóstico clássico baseia-se numa fragmentação da informação (modelos de gesso, radiografias cefalométricas e panorâmicas bidimensionais, fotografias intra e extraorais), impedindo a criação de um paciente virtual verdadeiramente fiável e dinâmico (Marradi et al., 2020).

Mais crítico ainda, este método torna o clínico mais vulnerável à fadiga cognitiva, à subjetividade e às limitações da percepção visual, exigindo um esforço permanente de integração e síntese mental. A transição para abordagens digitais e algorítmicas não representa, portanto, uma simples evolução ergonómica, mas antes uma necessidade metodológica destinada a transformar uma estimativa clínica sujeita a enviesamentos humanos num processo diagnóstico mais padronizado e reprodutível.

Embora a adoção da inteligência artificial continue a apresentar desafios técnicos, nomeadamente na deteção de estruturas anatómicas complexas e de variações morfológicas, as limitações deste paradigma tradicional tornam-se evidentes em todas as etapas do fluxo de trabalho clínico.

1.1.1 Fluxo de Trabalho Convencional

O paradigma tradicional, descrito como *gold standard*, baseia-se num fluxo de trabalho materialmente fragmentado e operacionalmente limitativo. Na prática, o diagnóstico ortodôntico clássico articula-se em torno de três pilares físicos: os modelos de gesso, a fotografia clínica bidimensional e as radiografias impressas.

Durante décadas, o modelo de gesso constituiu a base desta abordagem, sendo obtido através de impressões em alginato ou silicone. Como demonstram Kardach et al. (2023), estes modelos físicos apresentam limitações estruturais importantes, incluindo o risco de fratura, a degradação física ao longo do tempo e a impossibilidade de manipulação virtual, apesar de terem sido considerados a referência para medições lineares, como a largura das arcadas ou o tamanho dentário. Deste modo, este *gold standard* funcionava simultaneamente como referência métrica e como fonte de limitações operacionais significativas.

Além disso, este fluxo de trabalho “analogico” encontra-se associado a uma importante sobrecarga operacional, evidenciada por Pouliezou et al. (2024), particularmente na gestão física dos processos clínicos. O armazenamento dos modelos de gesso dificulta a partilha imediata de informação entre profissionais, complica a recuperação de dados e exige espaço físico considerável.

Neste sistema, o paciente não é compreendido como um conjunto dinâmico e integrado, mas antes como uma coleção de elementos desconexos — uma radiografia observada num negatoscópio, um modelo de gesso armazenado numa caixa — que o clínico necessita de reconstruir mentalmente. Trata-se, portanto, de um processo estático aplicado a uma condição biológica dinâmica, no qual cada etapa de transferência material, desde a impressão até à obtenção do modelo final, pode introduzir uma margem de erro cumulativa antes mesmo do início da análise diagnóstica.

1.1.2 Limitações da Imagiologia Bidimensional

Se o modelo físico apresenta limitações relacionadas com a sua materialidade, a imagiologia radiológica convencional evidencia, por sua vez, limitações inerentes à sua natureza bidimensional. Esta abordagem confronta-se com um constrangimento físico incontornável: a representação de uma anatomia tridimensional complexa num único plano bidimensional.

Como demonstra a meta-análise de Qian et al. (2022), esta redução dimensional conduz inevitavelmente a distorções geométricas, incluindo ampliação

radiológica e sobreposição de estruturas bilaterais, comprometendo a precisão das medições lineares quando comparadas com a realidade anatômica obtida através da CBCT.

Embora alguns algoritmos recentes demonstrem capacidade de traçado equivalente, ou até superior, à do clínico (Bor et al., 2024), estes sistemas não corrigem o viés estrutural associado à própria aquisição bidimensional da imagem. Ao analisar imagens bidimensionais, a inteligência artificial limita-se a automatizar a interpretação de uma representação geometricamente imperfeita: melhora a consistência e a reprodutibilidade dos traçados, mas permanece incapaz de ultrapassar as limitações inerentes à ausência de profundidade anatômica real.

1.1.3 Variabilidade Interobservador e Intraobservador

A fiabilidade da análise cefalométrica enfrenta um obstáculo biológico fundamental: a subjetividade da percepção humana. O conceito de “ponto de referência” (*landmark*) corresponde a uma convenção geométrica interpretada sobre estruturas anatômicas frequentemente sobrepostas ou pouco definidas radiograficamente. Consequentemente, a identificação destes pontos anatômicos (*landmark identification*) constitui uma das principais fontes de erro diagnóstico.

O estudo comparativo conduzido por Meriç e Naoumova (2020) evidencia a fragilidade do traçado manual. Esta limitação encontra-se amplamente documentada na literatura, demonstrando frequentemente menor consistência relativamente aos métodos assistidos ou informatizados. Tal decorre da variabilidade inter e intra-observador, uma vez que o desempenho humano é inevitavelmente influenciado por fatores como a experiência clínica, a fadiga visual e a subjetividade interpretativa.

Na tentativa de reduzir a imprecisão associada à observação humana, Kim et al. (2020), na validação de um sistema baseado em *deep learning*, demonstraram que os algoritmos apresentam uma vantagem fundamental: a repetibilidade analítica. Ao contrário do erro humano, frequentemente variável e inconsistente, os erros produzidos por sistemas algorítmicos tendem a ser sistemáticos e reproduzíveis. Os resultados demonstraram que o algoritmo atingiu uma taxa de deteção semelhante à de clínicos especialistas, reduzindo simultaneamente os enviesamentos associados à subjetividade visual e à fadiga cognitiva.

1.1.4 Limitações Operacionais e Temporais

Para além das limitações relacionadas com a precisão diagnóstica, a análise cefalométrica convencional representa uma carga temporal significativa que compromete a eficiência do fluxo de trabalho clínico.

O estudo comparativo de Meriç e Naoumova (2020), ao comparar métodos de traçado manual, assistido por aplicação informática e totalmente automatizado, evidenciou este “custo oculto”. Os autores demonstraram que a técnica tradicional exige um investimento temporal desproporcionado para uma tarefa repetitiva, enquanto as soluções automatizadas oferecem níveis de fiabilidade semelhantes num intervalo temporal substancialmente inferior.

Deste modo, a manutenção exclusiva da análise manual deixa de representar apenas uma opção metodológica, passando a constituir uma limitação objetiva da produtividade clínica. Em contrapartida, a integração da inteligência artificial permite reduzir significativamente o tempo dedicado à execução técnica, possibilitando ao clínico concentrar-se em tarefas de maior valor acrescentado, nomeadamente no diagnóstico, no planeamento terapêutico e na tomada de decisão clínica (Meriç & Naoumova, 2020).

1.2 Inteligência Artificial em Ortodontia

Face à subjetividade clínica anteriormente descrita e às limitações estruturais da imagiologia convencional, a integração da inteligência artificial deixou de representar apenas uma evolução tecnológica, assumindo-se progressivamente como uma estratégia metodológica para a padronização diagnóstica.

Contudo, o termo “inteligência artificial” continua frequentemente a ser utilizado de forma vaga e imprecisa no discurso clínico. Torna-se, por isso, essencial compreender os seus princípios fundamentais e desmistificar a ideia de uma “caixa negra” autónoma. Na realidade, a inteligência artificial baseia-se em arquiteturas algorítmicas específicas, sustentadas por modelos matemáticos e estatísticos bem definidos.

Segundo a scoping review de Bichu et al. (2021), a ortodontia evoluiu de sistemas especialistas baseados em regras fixas para modelos de aprendizagem automática (machine learning), capazes de melhorar progressivamente através da exposição contínua aos dados. Esta evolução representa uma mudança paradigmática significativa: os sistemas deixam de apenas executar instruções programadas e passam a aprender padrões complexos diretamente a partir de imagens radiológicas, modelos digitais e estruturas tridimensionais (Mohammad-Rahimi et al., 2021).

1.2.1 Conceitos Fundamentais de Inteligência Artificial

Para o clínico, torna-se fundamental distinguir os diferentes níveis da inteligência artificial, evitando a banalização conceptual frequentemente associada ao termo. Como explicam Bichu et al. (2021), a inteligência artificial não corresponde a uma tecnologia única, mas antes a um conjunto de campos computacionais interligados.

No nível mais abrangente encontra-se a inteligência artificial, entendida como qualquer sistema computacional capaz de reproduzir determinadas funções cognitivas humanas. Contudo, na ortodontia, a principal transformação ocorre através do machine learning (aprendizagem automática).

Ao contrário dos algoritmos tradicionais, baseados em regras explicitamente programadas pelo ser humano (“se X, então Y”), o machine learning permite que o computador aprenda autonomamente padrões e regras diretamente a partir dos dados disponíveis, sem necessidade de programação específica para cada situação clínica.

Dentro deste domínio, o deep learning (aprendizagem profunda), particularmente através das Redes Neurais Convolucionais (Convolutional Neural Networks – CNN), constitui atualmente uma das abordagens mais relevantes para análise de imagem médica. Estas redes conseguem extrair automaticamente características relevantes da imagem, como contornos, contrastes e formas anatómicas, através de múltiplas camadas de processamento inspiradas na organização do córtex visual humano.

Diferentemente dos modelos clássicos, nos quais o operador necessitava de indicar manualmente as características relevantes da imagem, as CNN aprendem autonomamente essas representações. Esta evolução tecnológica permitiu avanços significativos na automatização da segmentação dentária, da identificação cefalométrica e da análise tridimensional em ortodontia.

1.2.2 Principais Aplicações na Ortodontia

O desenvolvimento das redes neurais ultrapassa atualmente a simples automatização acelerada das tarefas executadas pelo clínico, tornando viáveis protocolos diagnósticos anteriormente incompatíveis com a prática clínica cotidiana.

Esta evolução manifesta-se, em primeiro lugar, pela capacidade de integrar múltiplos fluxos de dados heterogêneos num ambiente digital unificado.

Para além das análises bidimensionais, a inteligência artificial desempenha um papel relevante na integração de dados tridimensionais complexos. Os algoritmos mais recentes permitem a sobreposição e fusão automáticas de modelos digitais obtidos através de scanners intraorais com imagens provenientes da Cone Beam Computed Tomography (CBCT). Esta integração possibilita a construção de um “paciente virtual 3D” mais completo e fiável, incorporando simultaneamente estruturas ósseas alveolares, raízes dentárias e coroas clínicas, constituindo uma base fundamental para o planeamento terapêutico virtual previsível e rigoroso (Preda et al., 2024).

É neste contexto que a segmentação tridimensional assume particular importância clínica. Durante muitos anos, a conceptualização tridimensional da biomecânica ortodôntica através da CBCT permaneceu limitada pela extrema morosidade da segmentação manual dentária e radicular. A separação individual das raízes relativamente ao osso alveolar exigia um tempo de manipulação incompatível com a prática clínica diária.

O modelo neuronal descrito e validado por Shaheen et al. (2021) procurou ultrapassar esta limitação temporal. Segundo os autores, o algoritmo desenvolvido permitiu realizar a identificação e separação automatizadas das estruturas dentárias em volumes complexos de CBCT com uma velocidade substancialmente superior à obtida por clínicos especialistas.

Consequentemente, esta integração tecnológica redefine o conceito de set-up virtual ortodôntico. O clínico deixa de planejar apenas movimentos coronários sobre modelos digitalizados e passa a integrar informações radiculares completas, antecipando potenciais colisões e limitações impostas pelo envelope ósseo, sem comprometer a produtividade clínica.

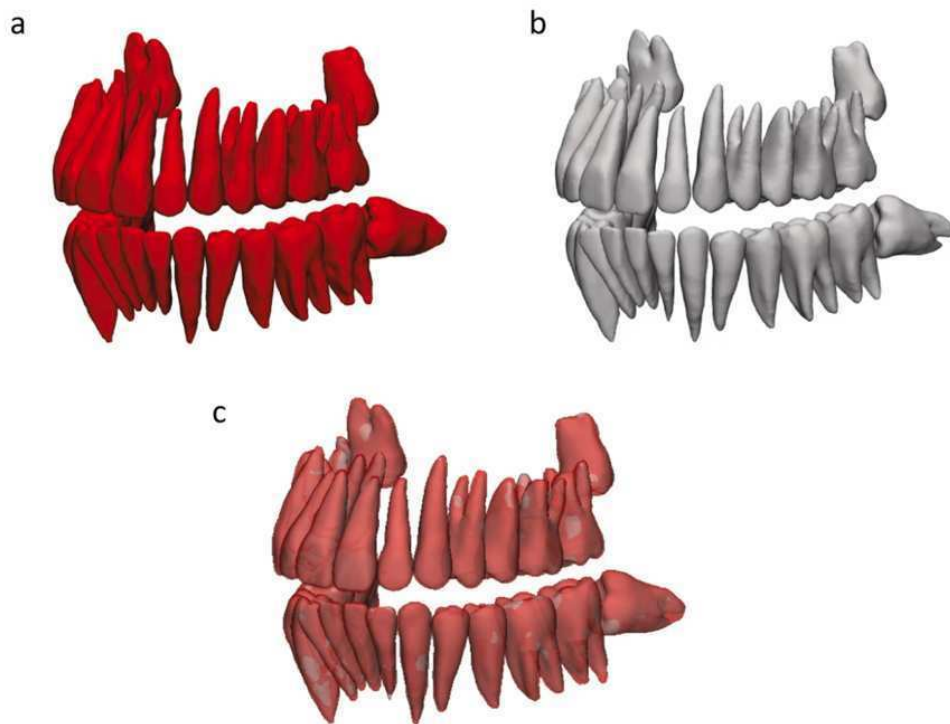


Figura 1 : Sobreposição espacial entre a segmentação de referência (ground truth), obtida manualmente por um especialista (representada a cinzento), e a segmentação automatizada produzida por um modelo de deep learning (representada a vermelho). Adaptado de Shaheen et al. (2021)

Finalmente, esta arquitetura digital permite ultrapassar algumas das limitações do Visual Treatment Objective (VTO) cefalométrico clássico, tradicionalmente condicionado por uma dupla limitação. Em primeiro lugar, tratava-se de uma projeção geométrica bidimensional, incapaz de representar adequadamente a complexidade tridimensional das estruturas craniofaciais. Em segundo lugar, este modelo apresentava limitações na previsão da resposta biológica e não linear dos tecidos moles face às movimentações dentárias e esqueléticas.

O estudo de Park et al. (2022) introduz uma abordagem baseada na antecipação guiada por dados volumétricos. Através de modelos de aprendizagem profunda (deep learning), a inteligência artificial demonstra capacidade para extrapolar modificações tridimensionais do perfil facial pós-tratamento com base nas movimentações dentárias e esqueléticas previamente planeadas.

Deste modo, esta modelação redefine a relação entre o clínico e o paciente, uma vez que o VTO deixa de corresponder a um simples morphing bidimensional do perfil facial e passa a constituir uma simulação dinâmica da arquitetura craniofacial. Contudo, estas previsões permanecem condicionadas pela elevada complexidade biomecânica e funcional dos tecidos moles, particularmente ao nível da região labial e muscular perioral.

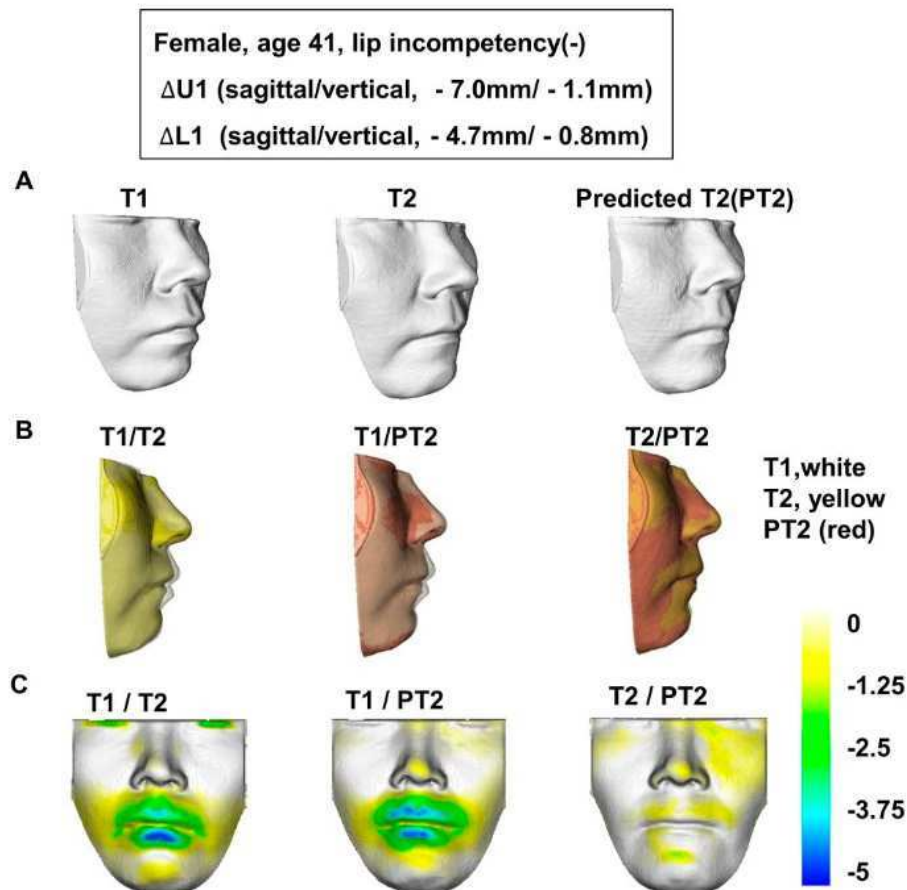


Figura 2 – Avaliação volumétrica dos tecidos moles faciais pós-ortodônticos através de mapa de distâncias gerado por rede adversarial generativa condicional (cGAN). Adaptado de Park et al. (2022)

1.2.3 Inteligência Artificial como Ferramenta de Apoio ao Diagnóstico

O diagnóstico ortodôntico pode ser entendido como um processo multifatorial complexo, no qual o clínico necessita de integrar simultaneamente dados oclusais (modelos), estéticos (fotografias), tridimensionais (estruturas esqueléticas) e funcionais. Perante esta elevada carga de informação, o processamento cognitivo humano tende frequentemente a recorrer a mecanismos heurísticos de simplificação da decisão, o que pode originar enviesamentos interpretativos e fenómenos de desatenção seletiva.

Neste contexto, o principal contributo da inteligência artificial não consiste em substituir integralmente o raciocínio clínico, mas antes em funcionar como um sistema auxiliar de análise objetiva de dados complexos e como um mecanismo de apoio à decisão clínica.

- **O nível "Macro"**

A uma escala global, a inteligência artificial atua prioritariamente na redução da variabilidade inter-observador associada a decisões clínicas de elevada relevância terapêutica, nomeadamente indicações cirúrgicas ou decisões de extração dentária.

A decisão de extração constitui um dos domínios mais amplamente investigados no âmbito da aprendizagem automática, precisamente devido à elevada variabilidade observada entre clínicos. Segundo a revisão de Bichu et al. (2021), as Redes Neurais Artificiais (Artificial Neural Networks – ANN) atingem níveis de precisão próximos de 94% na validação de decisões de extração e cerca de 92,8% na definição do tipo de ancoragem ortodôntica necessária.

Além disso, a inteligência artificial demonstra particular interesse na abordagem de casos “borderline”, nos quais a decisão terapêutica apresenta maior complexidade clínica. Estudos de Choi et al. (2019) e Li et al. (2019), citados por Bichu et al. (2021), demonstraram que modelos neuronais conseguem prever a necessidade de cirurgia ortognática com taxas de precisão próximas de 96%. Ao integrar simultaneamente múltiplas variáveis clínicas — incluindo tipologia esquelética, apinhamento dentário e parâmetros cefalométricos —, a inteligência artificial pode fornecer ao clínico uma segunda análise baseada em padrões estatísticos derivados de grandes bases de dados clínicos. Deste modo, estas ferramentas contribuem potencialmente para a redução de determinados enviesamentos cognitivos associados à elaboração do plano de tratamento.

Contudo, importa salientar que a fiabilidade destes sistemas permanece fortemente dependente da qualidade, diversidade e representatividade dos dados utilizados no treino algorítmico.

- **O nível "Micro"**

À escala imagiológica, a inteligência artificial pode igualmente atuar como ferramenta auxiliar na compensação de limitações perceptivas humanas.

A interpretação de exames bidimensionais, como a radiografia panorâmica, encontra-se frequentemente condicionada por “ruído” anatômico, incluindo sobreposições ósseas e estruturas adjacentes, como as vértebras cervicais, que podem dificultar a detecção de anomalias clinicamente relevantes.

O estudo de Kuwada et al. (2020) ilustra esta função de apoio diagnóstico através da utilização de modelos de deep learning especificamente treinados para a detecção de dentes supranumerários inclusos na região incisiva maxilar, uma área frequentemente difícil de interpretar radiograficamente.

Nestes casos, a inteligência artificial atua como um sistema complementar de detecção, direcionando a atenção do clínico para possíveis alterações anatômicas que poderiam passar despercebidas durante a interpretação convencional. Esta capacidade poderá contribuir para a redução do risco de erros diagnósticos suscetíveis de comprometer o planeamento biomecânico e o prognóstico terapêutico.

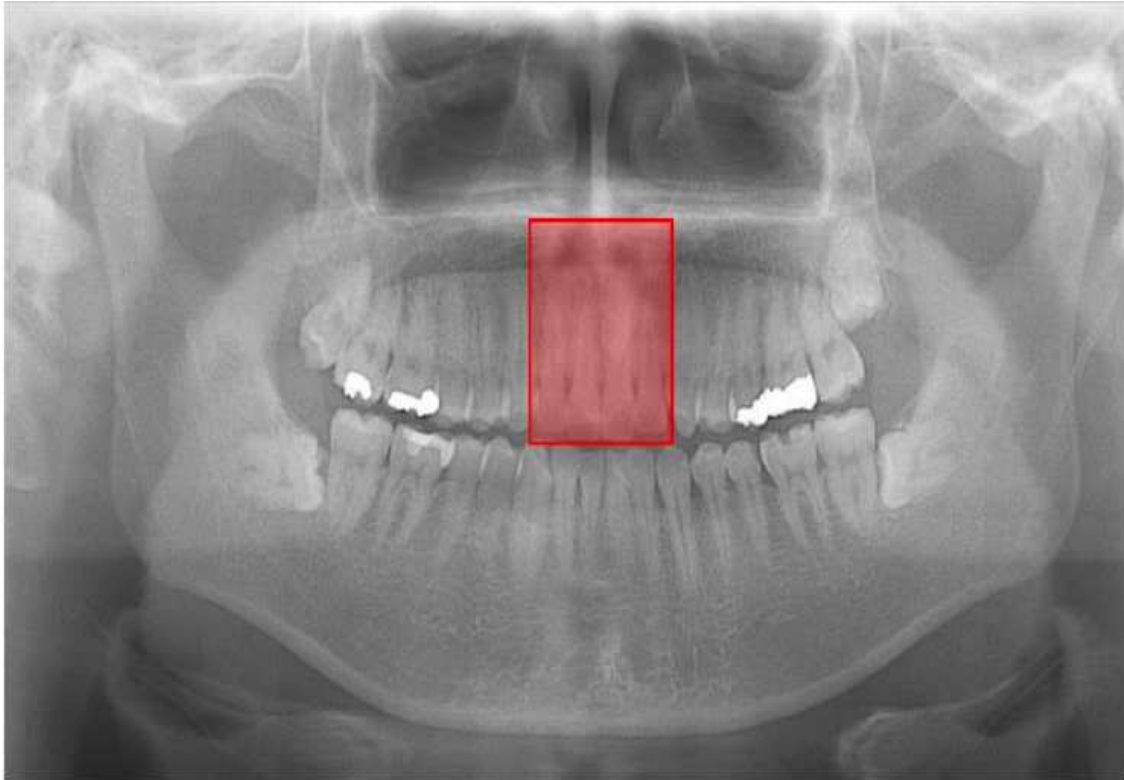


Figura 3 : Exemplo de identificação automatizada de dentes supranumerários incluídos em radiografia panorâmica. Os quadros de detecção ilustram a capacidade de uma rede neuronal convolucional para identificar a anomalia dentária (mesiodens), apesar da sobreposição de estruturas anatômicas adjacentes. Adaptado de Kuwada et al. (2020).

A inteligência artificial aplicada ao diagnóstico posiciona-se, portanto, na interseção entre a vigilância clínica e a análise matemática dos dados. O seu principal objetivo consiste em apoiar o processo de decisão através de uma análise padronizada, extensa e potencialmente menos sujeita a determinados enviesamentos humanos. Contudo, a decisão terapêutica final permanece da responsabilidade do clínico, que continua a desempenhar um papel central na interpretação crítica dos resultados e na validação clínica das recomendações fornecidas pelo algoritmo.

II. Análise Comparativa entre Métodos Convencionais e Métodos Assistidos por Inteligência Artificial

2.1 Precisão Diagnóstica e Reprodutibilidade

Em ortodontia, a integração da inteligência artificial não pode limitar-se à promessa de otimização temporal. Antes de qualquer implementação clínica, estas ferramentas devem demonstrar validade diagnóstica através de dois critérios fundamentais: a exatidão das medições realizadas e a reprodutibilidade dos resultados obtidos.

Historicamente, o traçado cefalométrico manual foi considerado o método de referência clínica, apesar da sua reconhecida suscetibilidade à variabilidade intra e interobservador. Neste contexto, a avaliação da inteligência artificial não consiste apenas em verificar a capacidade de reproduzir o desempenho humano, mas sobretudo em determinar se estes sistemas conseguem reduzir a subjetividade inerente à interpretação clínica, promovendo maior consistência diagnóstica.

2.1.1 Desempenho dos Sistemas de Cefalometria Automatizada

Em ortodontia, a avaliação dos algoritmos de aprendizagem profunda aplicados à cefalometria levanta um importante paradoxo clínico: desempenhos estatísticos globais muito elevados podem coexistir com erros significativos em situações clínicas individuais.

A meta-análise de Schwendicke et al. (2021) demonstrou que os sistemas de inteligência artificial conseguem atualmente posicionar pontos cefalométricos com erros médios inferiores a 2 mm, respeitando os limites de tolerância clínica habitualmente aceites. Do ponto de vista estatístico, estes algoritmos apresentam frequentemente níveis de reprodutibilidade superiores aos observados em operadores humanos, uma vez que não se encontram sujeitos a fadiga visual, flutuações de atenção ou variabilidade interpretativa diária.

Contudo, uma análise mais detalhada destes resultados evidencia limitações importantes. Kunz et al. (2020), ao avaliarem uma rede neuronal convolucional (Convolutional Neural Network – CNN), verificaram que o algoritmo apresentava elevado desempenho na identificação de estruturas anatómicas de elevado contraste e limites bem definidos, como os incisivos. Em contrapartida, a fiabilidade diminuía significativamente em regiões anatómicas complexas ou marcadas por sobreposição estrutural, como o Pório ou a fissura pterigomaxilar.

Clinicamente, esta limitação assume particular relevância, uma vez que erros localizados podem permanecer mascarados por excelentes médias estatísticas globais. Embora o desempenho médio do algoritmo possa ser considerado satisfatório, pequenas falhas em regiões críticas podem comprometer o diagnóstico individual, especialmente em casos de assimetria craniofacial ou dismorfoses severas.

Os estudos atuais demonstram ainda que a inteligência artificial não produz novas interpretações anatómicas independentes. Segundo Schwendicke et al. (2021), os algoritmos limitam-se essencialmente a reproduzir os padrões presentes nos dados utilizados durante o treino, incluindo as limitações e variabilidades inerentes às decisões humanas previamente incorporadas nas bases de dados.

Deste modo, torna-se arriscado assumir que uma elevada precisão geométrica corresponde automaticamente a um diagnóstico clinicamente seguro. Ao contrário do clínico experiente, os algoritmos continuam limitados na capacidade de contextualizar achados anatómicos incomuns, interpretar artefactos radiográficos ou reconhecer situações clínicas fora dos padrões presentes no treino algorítmico.

2.1.2 Limitações da Segmentação Automática e da Detecção de Patologias

Embora os algoritmos demonstrem elevada precisão na identificação de estruturas ósseas com elevado contraste radiográfico, o seu desempenho torna-se significativamente mais variável na análise de tecidos moles e na deteção de determinadas patologias.

Os estudos de Bulatova et al. (2021) e Kőz et al. (2024) demonstram que os algoritmos apresentam maior dificuldade na identificação automática de pontos cefalométricos localizados nos tecidos moles, como o pronasal ou o subnasal. Esta limitação relaciona-se diretamente com a reduzida radiopacidade e menor definição anatómica destas estruturas em imagiologia bidimensional.

Perante contornos anatómicos pouco definidos, os sistemas algorítmicos tendem a inferir posicionamentos através de padrões estatísticos, em vez de reconhecer diretamente estruturas anatómicas claramente delimitadas. Consequentemente, apesar de a automatização acelerar o fluxo de trabalho clínico, a validação pelo ortodontista permanece indispensável, sobretudo em contextos de planeamento ortognático ou avaliação estética facial.

Em contrapartida, estas limitações tendem a diminuir significativamente em imagiologia tridimensional baseada em Cone Beam Computed Tomography (CBCT). O estudo de Hadzic et al. (2023) demonstrou que redes neurais convolucionais apresentam elevada fiabilidade na deteção de lesões periapicais em volumes tridimensionais.

Neste contexto, a ausência de sobreposições anatómicas e o maior contraste entre estruturas saudáveis e áreas osteolíticas favorecem significativamente o desempenho algorítmico. Os dados atualmente disponíveis sugerem, portanto, uma distinção importante: a inteligência artificial demonstra elevada eficácia no rastreio volumétrico tridimensional, mas continua a apresentar limitações relevantes na interpretação subtil dos tecidos moles em imagens bidimensionais.

2.2 Eficiência Clínica e Impacto no Planejamento Terapêutico

A integração da inteligência artificial em ortodontia ultrapassa significativamente a simples melhoria da precisão das medições. A sua implementação influencia progressivamente a organização global do fluxo de trabalho clínico e a própria interação terapêutica com o paciente.

A avaliação da pertinência destas tecnologias exige, por isso, uma análise que vá além do desempenho algorítmico isolado, considerando igualmente o impacto clínico direto da automatização. Este contributo manifesta-se essencialmente em duas dimensões complementares.

A primeira dimensão é operacional, através da automatização de tarefas repetitivas e demoradas, permitindo otimizar o tempo clínico disponível. A segunda dimensão relaciona-se com a comunicação terapêutica, uma vez que as ferramentas digitais passam progressivamente a funcionar como suporte visual privilegiado para explicação do plano de tratamento e previsão dos resultados clínicos.

Deste modo, a inteligência artificial deixa gradualmente de desempenhar apenas um papel técnico de processamento de dados, assumindo-se como um elemento central na prática ortodôntica contemporânea.

2.2.1 Redução do Tempo de Trabalho Clínico

A demonstração da eficiência clínica da inteligência artificial passa inevitavelmente pela quantificação objetiva do ganho de tempo associado ao processo diagnóstico.

Historicamente, o traçado cefalométrico foi considerado uma das tarefas mais demoradas da rotina ortodôntica, sendo frequentemente descrito como um procedimento exigente e repetitivo. Quer através do método convencional com traçado manual em folhas de acetato, quer através de sistemas digitais semiautomatizados, esta etapa exige uma carga de trabalho significativa e dificilmente reduzível.

Em muitos contextos clínicos, a realização completa da análise cefalométrica pode consumir entre quinze e vinte minutos de atenção exclusiva por paciente, representando um custo operacional importante na gestão de uma prática ortodôntica moderna.

Contudo, os estudos mais recentes demonstram que a automatização altera substancialmente este paradigma. Gupta et al. (2024) demonstraram que plataformas web suportadas por inteligência artificial apresentam velocidades de execução significativamente superiores às dos métodos manuais ou de aplicações móveis convencionais.

Segundo os autores, sistemas totalmente automatizados podem realizar análises até nove vezes mais rapidamente do que as abordagens tradicionais, reduzindo drasticamente o intervalo temporal entre a aquisição da imagem e a obtenção dos resultados diagnósticos.

Estes resultados são corroborados pela meta-análise de Hendrickx et al. (2024), que sintetizou evidência proveniente de múltiplos estudos internacionais. Os autores concluíram que algoritmos de inteligência artificial, tanto em imagiologia bidimensional como tridimensional, conseguem frequentemente concluir a detecção automática de pontos cefalométricos em menos de um minuto, muitas vezes em poucos segundos.

Todavia, a relevância clínica desta velocidade não reside exclusivamente na redução do tempo técnico de execução. O principal benefício parece relacionar-se com a diminuição da fadiga cognitiva e da variabilidade interobservador associadas à repetição de tarefas mecânicas.

Ao reduzir o tempo dedicado ao posicionamento manual de pontos anatômicos, a inteligência artificial permite ao ortodontista concentrar-se em funções de maior complexidade clínica, incluindo a interpretação crítica das morfologias craniofaciais, a identificação de anomalias anatômicas e a elaboração de estratégias terapêuticas individualizadas.

Esta reorganização do fluxo de trabalho favorece uma abordagem colaborativa entre o clínico e a tecnologia, na qual os sistemas automatizados assumem tarefas repetitivas, enquanto a supervisão crítica e a decisão clínica permanecem dependentes da intervenção humana.

2.2.2 Simulação Preditiva e Comunicação com o Doente

Os trabalhos de Park et al. (2022) demonstram que a inteligência artificial permite atualmente gerar simulações tridimensionais (Visual Treatment Objective – VTO) do resultado facial pós-tratamento com elevado realismo visual.

Contudo, apesar da elevada precisão geométrica associada às movimentações dentárias e esqueléticas, a previsão da resposta biológica dos tecidos moles continua a representar um desafio significativo. Tal como discutido na secção 2.1.2, os algoritmos mantêm limitações relevantes na modelação precisa da dinâmica muscular e dos tecidos periorais, particularmente na região labial. Consequentemente, o VTO não deve ser interpretado como uma previsão biológica absoluta ou garantida, mas antes como uma ferramenta visual de apoio à comunicação clínica.

É precisamente neste contexto comunicacional que a inteligência artificial revela uma das suas aplicações mais relevantes. O estudo de Mourgues et al. (2024) demonstrou que as simulações digitais do sorriso apresentam um impacto emocional significativo na percepção dos pacientes.

Ao transformar explicações clínicas abstratas em representações visuais compreensíveis, o VTO facilita a compreensão do tratamento proposto, reduz a ansiedade associada à terapêutica e promove maior envolvimento do paciente no processo clínico.

Deste modo, estas ferramentas digitais podem funcionar como importantes instrumentos de adesão terapêutica, permitindo ao paciente visualizar de forma concreta os potenciais resultados do tratamento.

Todavia, a utilização destas simulações exige prudência clínica e enquadramento adequado. O estudo de Kostov e Yordanova (2025) demonstrou que apenas uma pequena percentagem dos pacientes aceita plenamente um diagnóstico exclusivamente automatizado, enquanto a maioria continua a exigir validação humana da decisão clínica.

Assim, a utilização do VTO deve permanecer subordinada à interpretação crítica do ortodontista. A inteligência artificial deve ser apresentada como ferramenta auxiliar de apoio visual e não como substituto autónomo da decisão médica. Cabe ao clínico contextualizar os limites biológicos das previsões digitais e garantir que a relação terapêutica permanece baseada na confiança e na responsabilidade profissional.

2.3 Limitações Tecnológicas e Considerações Éticas

Apesar das vantagens operacionais associadas à inteligência artificial, nomeadamente na otimização temporal e nas simulações tridimensionais, estas tecnologias apresentam limitações estruturais importantes que condicionam a sua utilização clínica.

Estas limitações ultrapassam os simples erros técnicos de medição e relacionam-se diretamente com os próprios princípios fundamentais da aprendizagem profunda (deep learning). A integração crescente dos algoritmos na tomada de decisão clínica levanta questões relacionadas com a representatividade dos dados de treino, a opacidade dos sistemas neuronais e a discrepância persistente entre simulação computacional e realidade biológica.

A análise crítica destes enviesamentos torna-se essencial para evitar uma dependência excessiva da automatização e preservar o papel interpretativo do ortodontista.

2.3.1 Enviesamento dos Dados de Treino e Representatividade Populacional

A fiabilidade da inteligência artificial depende diretamente da qualidade, diversidade e representatividade dos dados utilizados durante o treino dos modelos algorítmicos.

Schwendicke et al. (2020), ao analisarem os desafios da inteligência artificial na medicina dentária, salientaram que os algoritmos reproduzem inevitavelmente os padrões presentes nas bases de dados de treino. Quando essas bases não representam adequadamente a diversidade populacional real, os sistemas tornam-se vulneráveis a enviesamentos diagnósticos.

Esta limitação encontra-se amplamente descrita na literatura. A revisão sistemática de Thurzo et al. (2022) demonstrou que muitos modelos de inteligência artificial em medicina dentária continuam a ser treinados utilizando dados provenientes de uma única instituição ou de populações geograficamente limitadas.

Como consequência, estes algoritmos podem apresentar reduzida capacidade de generalização quando aplicados a pacientes com características

craniofaciais, demográficas ou étnicas diferentes das presentes nos dados originais.

O principal risco associado a esta limitação consiste na potencial imposição de padrões diagnósticos uniformizados a populações biologicamente distintas. Schwendicke et al. (2020) alertam para a possibilidade de desenvolvimento de formas de “discriminação algorítmica”, particularmente quando modelos treinados em populações específicas são utilizados indiscriminadamente em contextos clínicos distintos.

Em ortodontia, esta problemática assume especial relevância, uma vez que parâmetros cefalométricos, padrões estéticos e características craniofaciais variam significativamente entre diferentes grupos populacionais. Assim, uma utilização acrítica destes sistemas poderá comprometer a individualização terapêutica e agravar desigualdades no acesso a cuidados de saúde adequados.

2.3.2 Opacidade Algorítmica e Interpretabilidade dos Sistemas

A elevada capacidade preditiva das redes neuronais profundas encontra-se frequentemente associada a um importante problema de interpretabilidade clínica: a denominada “caixa negra” (black box).

Rahim et al. (2024) salientam que, embora os algoritmos demonstrem elevada eficácia na deteção de padrões imagiológicos complexos, o processo lógico que conduz às decisões algorítmicas permanece frequentemente inacessível ao clínico.

Esta ausência de transparência levanta importantes questões éticas, clínicas e jurídicas. O ortodontista pode tornar-se responsável por decisões terapêuticas sugeridas por sistemas cujo raciocínio interno não consegue verificar, interpretar ou justificar adequadamente.

Perante esta problemática, a literatura recente tem defendido o desenvolvimento de modelos de “inteligência artificial confiável” (trustworthy AI). Segundo Ma et al. (2022), os sistemas aplicados à medicina dentária devem incorporar

princípios de inteligência artificial explicável (Explainable Artificial Intelligence – XAI).

Neste paradigma, o objetivo deixa de ser apenas alcançar elevados níveis de precisão estatística, passando igualmente pela capacidade de compreender os fatores anatômicos e imagiológicos que sustentam a decisão do algoritmo.

Uma das estratégias mais frequentemente utilizadas para promover esta transparência consiste na aplicação de mapas de calor (saliency maps ou heatmaps). Estes sistemas permitem sobrepor áreas coloridas às imagens radiográficas, destacando as regiões anatômicas que influenciaram a decisão algorítmica.

Deste modo, o clínico consegue visualizar quais os elementos imagiológicos efetivamente considerados pela rede neuronal, reduzindo parcialmente o efeito de “caixa negra”.

Assim, a inteligência artificial deixa de funcionar como um sistema opaco de decisão automática e aproxima-se progressivamente de um modelo de apoio clínico mais transparente, verificável e compatível com os princípios de responsabilidade médica.

A Figura 4 apresenta um exemplo de aplicação da Explainable Artificial Intelligence (XAI) na deteção de cárie dentária. Embora esta aplicação não pertença diretamente ao domínio da Ortodontia, foi selecionada por ilustrar de forma clara o funcionamento dos mapas de calor utilizados para aumentar a transparência dos modelos de inteligência artificial. Este princípio é igualmente aplicável aos sistemas de IA utilizados no diagnóstico ortodôntico.

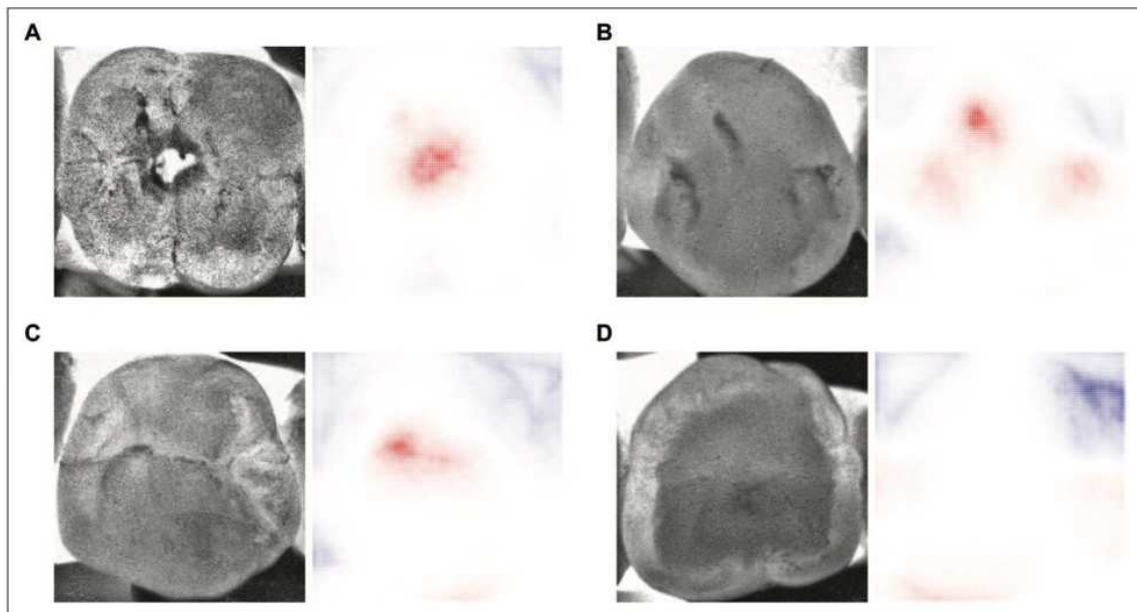


Figura 4 : Ilustração de Inteligência Artificial Explicável (*Explainable Artificial Intelligence – XAI*) através de mapas de ativação (*saliency maps*). O algoritmo justifica o nível de confiança da decisão identificando visualmente os píxeis que influenciaram a classificação diagnóstica. As zonas vermelhas intensas correspondem a estruturas associadas à presença de lesão cáriosa evidente (A, B), enquanto as zonas azuis indicam áreas compatíveis com esmalte saudável (D). O caso (C) demonstra a capacidade interpretativa do modelo, ao identificar uma região marginalmente suspeita (ponto vermelho central), aumentando a probabilidade estimada de cárie para 0,29, embora mantendo corretamente o diagnóstico final de dente saudável. Adaptado de Ma et al. (2022).

2.3.3 Limitações Biológicas dos Modelos Preditivos

Finalmente, um dos limites mais relevantes da inteligência artificial em ortodontia reside na dificuldade em modelar a complexidade biológica individual. Embora os algoritmos sejam capazes de calcular com elevada precisão deslocamentos dentários e esqueléticos, a previsão da resposta dos tecidos moles continua a constituir um desafio significativo. Neste contexto, a modelação algorítmica pode confundir uma projeção geométrica com a resposta real de tecidos biológicos, cuja dinâmica depende de múltiplas variáveis individuais.

Os trabalhos de Chanmanee e Nakornnoi (2024) evidenciam esta limitação, demonstrando que os softwares ainda apresentam dificuldades em prever de forma fiável as alterações faciais decorrentes do tratamento ortodôntico. Esta imprecisão resulta, em parte, da dependência de rácios matemáticos entre estruturas ósseas e tecidos moles, os quais nem sempre integram adequadamente fatores individuais como a tonicidade muscular, a elasticidade cutânea, a espessura dos tecidos moles ou a distribuição adiposa facial.

Este desfasamento entre modelação computacional e resposta biológica torna-se particularmente evidente em movimentos de grande amplitude, como os realizados em cirurgia ortognática. Awad et al. (2022) demonstram que os softwares de planeamento tridimensional apresentam limitações relevantes na previsão da resposta de zonas estéticas altamente móveis, em particular a região perioral e os lábios. O problema reside no facto de muitos modelos se basearem sobretudo na deformação geométrica de uma malha digital, aproximando-se de um processo de morphing, sem simular integralmente a reorganização dinâmica dos tecidos profundos sobre a nova estrutura óssea.

A revisão de literatura de Olejnik et al. (2024) confirma que, apesar dos avanços significativos na imagiologia tridimensional, a previsão da resposta dos tecidos moles permanece clinicamente incerta. Esta constatação exige uma mudança de perspetiva: a inteligência artificial ortodôntica consegue manipular píxeis, voxels e modelos geométricos, mas ainda não reproduz plenamente a complexidade metabólica, celular e biomecânica dos tecidos vivos. Assim, a modelação virtual não deve substituir o julgamento clínico do ortodontista. A previsão algorítmica deve ser entendida como uma aproximação matemática útil, mas sempre subordinada à imprevisibilidade biológica inerente a cada paciente.

III. Implicações Éticas, Jurídicas e Perspetivas Futuras da Inteligência Artificial em Ortodontia

3.1 Responsabilidade Profissional e Enquadramento Jurídico

A introdução da inteligência artificial no consultório ortodôntico não altera apenas o fluxo de trabalho clínico; implica também uma reconfiguração do quadro ético e jurídico da prática profissional. Atualmente, a questão central não se limita a saber se o algoritmo é mais preciso do que o ser humano, mas inclui também a definição de responsabilidade em caso de erro diagnóstico ou terapêutico.

Perante softwares capazes de gerar análises, segmentações e propostas de tratamento com elevado grau de autonomia, o clínico permanece juridicamente vinculado ao dever de supervisão e validação. Esta realidade obriga a repensar o papel do ortodontista, que deixa de ser apenas utilizador da tecnologia para assumir uma função crítica de auditor clínico. Assim, para evitar a transferência acrítica da decisão para sistemas que não domina integralmente, torna-se indispensável manter o profissional no centro de cada decisão terapêutica.

3.1.1 Responsabilidade Associada à Utilização da Inteligência Artificial

A integração da inteligência artificial no consultório introduz uma tensão significativa no ordenamento jurídico tradicional. Embora os softwares demonstrem elevada capacidade para segmentar estruturas anatómicas, processar dados e sugerir decisões clínicas, estas tecnologias não possuem personalidade jurídica, não podendo ser diretamente responsabilizadas por eventuais danos.

Esta lacuna cria um cenário complexo, no qual os ortodontistas delegam uma parte crescente da análise diagnóstica em sistemas algorítmicos frequentemente opacos, continuando, contudo, a ser os principais responsáveis pelas consequências clínicas da decisão final.

Khullar et al. (2022) demonstram que a utilização de algoritmos no diagnóstico pode gerar incerteza nos pacientes relativamente à atribuição de responsabilidade em caso de falha. No entanto, no quadro jurídico atual, o profissional que valida e aplica o plano de tratamento permanece o garante último da decisão clínica, independentemente da complexidade técnica do software utilizado.

Perante um eventual litígio, a tecnologia não deve ser entendida como um escudo jurídico para o clínico, mas antes como um elemento que aumenta a exigência de rastreabilidade, documentação e supervisão. Di Mauro et al. (2025) sublinham a importância da gestão rigorosa dos registos clínicos em contextos assistidos por inteligência artificial. Se um algoritmo sugerir um planeamento biologicamente inadequado e o profissional o aplicar sem validação crítica, a falha técnica poderá ser interpretada como insuficiência de supervisão humana.

Esta realidade coloca o clínico numa posição de particular responsabilidade. A inteligência artificial deve, por isso, ser utilizada como ferramenta de apoio e mitigação de risco, e não como substituto da análise profissional. A responsabilidade do ortodontista permanece intransmissível, exigindo-lhe capacidade crítica para identificar, corrigir ou rejeitar resultados algorítmicos incompatíveis com a segurança biológica e terapêutica do paciente.

3.1.2 O Conceito Human-in-the-Loop (HITL)

O modelo Human-in-the-loop consiste na integração sistemática da supervisão humana no processo algorítmico, funcionando como mecanismo de validação, correção e responsabilização dos resultados gerados pela máquina. No contexto clínico atual, esta abordagem apresenta-se como uma estratégia essencial para responder à vulnerabilidade ética e jurídica associada à utilização da inteligência artificial, preservando a autoridade do profissional sobre o sistema (Contaldo et al., 2024).

Sob esta perspetiva, o ortodontista deixa de ser um validador passivo de dados e passa a assumir o papel de filtro crítico permanente. Na prática clínica, sempre que a inteligência artificial executa uma segmentação, uma análise cefalométrica ou uma modelação tridimensional complexa, a intervenção humana permanece indispensável. O clínico deve verificar criteriosamente os pontos cefalométricos, avaliar a coerência das movimentações propostas e exercer um direito de veto sempre que o planeamento apresente riscos biológicos, biomecânicos ou éticos (Kocak & Cuocolo, 2026).

Esta interação contínua entre operador e ferramenta introduz uma necessária “fricção” no processo digital, considerada essencial para preservar a segurança clínica. A facilidade com que alguns sistemas permitem aprovar diagnósticos complexos com um único clique pode favorecer uma redução da vigilância profissional (Goffin, 2025). O modelo Human-in-the-loop contraria esta tendência ao exigir participação ativa do clínico, correção dos desvios algorítmicos e documentação das decisões tomadas.

Deste modo, a responsabilidade final não é apenas assumida no plano jurídico, mas exercida tecnicamente através de uma governação clínica que coloca o julgamento humano e a segurança do paciente acima da automatização total.

3.1.3 Enviesamento de Automação e Dependência Tecnológica

O controlo humano sobre os sistemas digitais, embora teoricamente assegurado pelos modelos de supervisão, enfrenta uma barreira psicológica persistente: o enviesamento de automação. À medida que sistemas de elevado desempenho são integrados na rotina clínica, a vigilância do ortodontista pode diminuir progressivamente, sobretudo quando a confiança na ferramenta se consolida.

Buçinca et al. (2021) demonstram que profissionais expostos a sistemas de apoio à decisão podem desenvolver dependência excessiva das recomendações da inteligência artificial. Este fenômeno não resulta apenas da tentativa de poupar esforço cognitivo, mas também da percepção do algoritmo como uma entidade matematicamente superior. Em clínicos menos experientes ou em situações de elevada complexidade diagnóstica, esta autoridade tecnológica pode levar à aceitação acrítica das sugestões apresentadas.

Esta complacência introduz riscos relevantes para a segurança do paciente. Kim et al. (2025), ao analisarem exames imagiológicos assistidos por inteligência artificial, demonstraram que, perante erros técnicos evidentes, como falsos positivos, os médicos podem manter tendência para sobrevalorizar a fiabilidade do algoritmo em detrimento da sua própria observação clínica.

Nestas circunstâncias, a inteligência artificial deixa de atuar como ferramenta auxiliar e passa a funcionar como uma autoridade decisória implícita. O risco final consiste na validação inadvertida de erros produzidos pela máquina, em que o profissional, em vez de corrigir a falha tecnológica, acaba por incorporá-la no raciocínio terapêutico. Assim, a prevenção do enviesamento de automação exige formação específica, validação sistemática e manutenção ativa do espírito crítico clínico.

3.2 Relação Médico-Dentista–Doente na Era Digital

A introdução da inteligência artificial no consultório altera o equilíbrio tradicional da relação entre clínico e paciente. Para além das questões jurídicas, transforma-se também a forma como a informação é transmitida e como o consentimento é obtido.

O algoritmo passa a ocupar um lugar visível na consulta, influenciando a comunicação através de simulações, previsões e representações visuais. Esta triangulação — clínico, máquina e paciente — exige um equilíbrio cuidadoso. Embora o ortodontista possa utilizar o poder comunicativo destas ferramentas,

deve preservar a sua autoridade médica e garantir que a tecnologia não substitua o diálogo clínico.

O desafio não consiste em prometer uma transparência absoluta sobre sistemas frequentemente complexos e parcialmente opacos, mas em assegurar ao paciente uma informação honesta, compreensível e esclarecida sobre as reais capacidades da inteligência artificial, os seus limites e a sua margem de erro.

3.2.1 Inteligência Artificial como Ferramenta de Comunicação Clínica

Atualmente, a inteligência artificial já não desempenha apenas uma função diagnóstica interna. Assume também um papel relevante na comunicação clínica, ao transformar medições complexas em imagens compreensíveis para o paciente.

Como referido anteriormente no contexto do paciente virtual 3D, a simulação do sorriso e do resultado facial pode tornar-se um suporte central na consulta inicial. Mourgues et al. (2026) demonstram que a utilização de simuladores digitais, como o SmileView, pode reforçar significativamente a motivação dos pacientes para iniciar tratamento ortodôntico. Esta projeção estética influencia a percepção que o paciente tem da sua própria condição e facilita a compreensão do plano terapêutico proposto.

Contudo, esta mediação visual só é clinicamente adequada se a simulação for apresentada como uma possibilidade e não como uma promessa. O estudo de Saini et al. (2025) mostra que o Digital Smile Design (DSD) guiado por inteligência artificial pode melhorar a satisfação global, mas exige prudência na sua interpretação. A previsão algorítmica tende a privilegiar a dimensão estética, podendo não integrar plenamente limites biomecânicos, periodontais e ósseos específicos do paciente.

Se o resultado final não corresponder à imagem idealizada apresentada no início do tratamento, a confiança do paciente pode ser comprometida. Assim, a

simulação digital deve ser acompanhada de explicações claras sobre as suas limitações e sobre a variabilidade biológica inerente ao tratamento ortodôntico.

3.2.2 Confiança, Transparência e Tomada de Decisão Partilhada

A síndrome do “oráculo” descreve a tendência psicológica para atribuir à previsão algorítmica um estatuto de verdade absoluta. Nesta dinâmica, o ecrã passa progressivamente a ditar a norma clínica, invertendo a hierarquia decisória entre tecnologia e profissional.

Esta situação ameaça a autoridade do ortodontista, sobretudo quando o software é percecionado como substituto da especialização humana e não apenas como ferramenta de suporte. Tun et al. (2025) salientam que a confiança excessiva em sistemas de apoio à decisão pode conduzir à desvalorização das competências críticas do clínico, transformando-o num executor das sugestões da máquina.

Devido a esta confiança desproporcional, o clínico pode tender a priorizar recomendações algorítmicas em detrimento do seu próprio julgamento e da observação direta do paciente. Rosenbacke et al. (2024) demonstram que esta submissão cognitiva pode persistir mesmo quando os resultados tecnológicos contradizem a análise clínica inicial ou a evidência biológica disponível.

Nestes casos, a ferramenta deixa de apoiar a decisão e passa a funcionar como uma autoridade seguida de forma acrítica. Esta dinâmica é particularmente problemática devido à natureza opaca de muitos algoritmos, cuja falta de explicabilidade pode dificultar a identificação da origem do erro. Em última análise, a dependência de recomendações algorítmicas potencialmente incorretas pode comprometer a precisão diagnóstica e a segurança do paciente, reforçando a necessidade de preservar uma autonomia profissional crítica e inabalável.

3.2.3 Consentimento Informado e Direito à Informação

A integração da inteligência artificial na prática clínica obriga a uma reavaliação do conceito de consentimento informado. O clínico assume a responsabilidade ética e legal de comunicar ao paciente que um algoritmo participa no processo diagnóstico, na simulação ou no planeamento terapêutico.

Contudo, esta transparência enfrenta o obstáculo da opacidade inerente a muitos sistemas de aprendizagem profunda, frequentemente descritos como “caixas negras”. Amann et al. (2020) advertem que a omissão do uso de inteligência artificial pode comprometer a autonomia do paciente e afetar a relação de confiança. Para que o consentimento seja eticamente aceitável, é necessário fornecer informação clara sobre a função da ferramenta, os seus benefícios, os seus limites e os riscos associados, mesmo que o funcionamento matemático interno não possa ser integralmente explicado.

Na prática, o ortodontista deve ser capaz de esclarecer os princípios gerais do software utilizado, admitindo a existência de margens de erro e limitações técnicas. Esta exigência aplica-se a qualquer sistema de suporte à decisão clínica.

Allen et al. (2026) reforçam esta perspetiva ao defenderem que, perante a utilização de ferramentas digitais avançadas, o paciente deve manter o direito de recusar a intervenção algorítmica. Tal implica que a tecnologia deve ser apresentada como complemento e não como imposição. A decisão de avançar com um tratamento mediado por inteligência artificial deve resultar de um acordo explícito, informado e voluntário.

3.3 O Futuro da Prática Ortodôntica

A introdução da inteligência artificial no consultório não representa apenas uma atualização técnica; corresponde a uma transformação profunda do papel do clínico. A execução manual tende progressivamente a dar lugar à supervisão estratégica, num modelo que pode ser descrito como inteligência aumentada.

Neste paradigma, a experiência humana articula-se com o poder de cálculo algorítmico, com o objetivo de aumentar a segurança, a precisão e a eficiência do tratamento. No entanto, esta evolução coloca um desafio importante ao ensino universitário, que continua frequentemente estruturado em modelos pedagógicos tradicionais.

Para preparar a prática ortodôntica do futuro, torna-se necessário reformular a formação académica, integrando competências digitais, pensamento crítico, literacia algorítmica e princípios éticos. Só assim será possível formar clínicos capazes de dominar a ferramenta digital sem abdicar da sua autonomia crítica.

3.3.1 Evolução do Papel do Ortodontista

A automatização das tarefas técnicas introduz uma mudança profunda na dinâmica quotidiana do consultório ortodôntico. Atualmente, a inteligência artificial assume progressivamente etapas tradicionalmente morosas, como a segmentação tridimensional de estruturas anatómicas, o traçado cefalométrico automatizado e a simulação preditiva de movimentações dentárias.

Esta transição exige que o clínico desenvolva novas competências digitais, que ultrapassam a técnica manual clássica (Thurzo et al., 2023). Com a introdução deste elevado poder de cálculo, o papel do ortodontista evolui de executor direto para supervisor estratégico do fluxo digital.

No entanto, esta evolução encerra um paradoxo fundamental: delegar tarefas na máquina não reduz a exigência clínica. Pelo contrário, a supervisão de algoritmos sofisticados, mas por vezes imprevisíveis, requer vigilância acrescida. Kazimierczak et al. (2024) reforçam que a validação manual regular é indispensável para identificar e corrigir erros algorítmicos suscetíveis de comprometer o plano de tratamento.

Embora o software demonstre elevada eficácia no processamento de dados biométricos, permanece incapaz de substituir o julgamento individualizado do profissional perante a singularidade biológica de cada paciente. O ortodontista afirma-se, assim, como o último filtro de segurança e como o único agente capaz de garantir que um modelo matemático abstrato é clinicamente exequível e biologicamente seguro.

3.3.2 O Conceito de Inteligência Aumentada

A inteligência aumentada redefine a relação entre clínico e tecnologia no consultório. Neste modelo, a máquina não substitui o profissional, mas funciona como amplificador cognitivo. Preda et al. (2025) demonstram que as soluções digitais atuais atuam como sistemas avançados de apoio à decisão, reforçando a capacidade analítica do ortodontista em vez de a substituir.

Esta sinergia cria uma colaboração direta, na qual o clínico utiliza o poder de cálculo para ultrapassar limitações humanas associadas ao volume de dados, à repetição de tarefas e à complexidade diagnóstica. A integração desta assistência no fluxo de trabalho permite melhorar a precisão do planeamento, especialmente em casos complexos, favorecendo uma cooperação estreita entre tecnologia e julgamento humano (Norman et al., 2025).

Estes sistemas de suporte processam grandes volumes de dados clínicos e científicos. Fawaz et al. (2025) explicam que estas ferramentas podem cruzar dados do paciente com evidência científica para propor soluções personalizadas. Contudo, o algoritmo propõe; o clínico dispõe. A máquina não deve ditar o tratamento, uma vez que a responsabilidade final pelas decisões de saúde permanece sempre atribuída ao profissional.

Esta abordagem híbrida é também relevante para a confiança do paciente. Lima et al. (2026) salientam que os pacientes tendem a perceber a inteligência artificial como ferramenta de apoio, mantendo maior confiança na competência do dentista do que na autonomia da máquina. Assim, o papel do clínico enquanto supervisor do algoritmo torna-se essencial para preservar a confiança terapêutica. Em última instância, o ser humano continua a constituir o centro decisório da prática ortodôntica.

3.3.3 Desafios Formativos e Educacionais

A evolução tecnológica acelerada da ortodontia impõe uma adaptação profunda dos programas universitários de medicina dentária. Ellakany et al. (2025) salientam que a inteligência artificial já integra a realidade acadêmica, sendo utilizada por muitos estudantes para fins educativos ou clínicos. Contudo, esta adoção precoce e frequentemente informal contrasta com a ausência de formação oficial estruturada.

Esta lacuna pedagógica levanta preocupações importantes, nomeadamente relacionadas com a confidencialidade dos dados dos pacientes, a segurança da informação e a capacidade dos futuros clínicos para compreenderem criticamente o funcionamento dos algoritmos. Como consequência, estudantes e jovens profissionais podem começar a utilizar ferramentas complexas sem possuir o substrato teórico necessário para identificar falhas técnicas, compreender os limites do processamento digital ou mitigar potenciais erros diagnósticos.

Face a este cenário, a integração da ciência de dados no currículo académico torna-se essencial para salvaguardar a qualidade e a segurança dos cuidados prestados. Alzahrani et al. (2025) identificam quatro eixos fundamentais para esta transição pedagógica: integração formal da inteligência artificial nos programas de estudo, definição clara de objetivos clínicos, formação simultânea

de estudantes e docentes, e estabelecimento de um enquadramento ético e legislativo rigoroso.

Esta reforma não se limita à aprendizagem dos alunos; exige também atualização contínua do corpo docente, de modo a acompanhar a inovação tecnológica. O objetivo central das instituições de ensino superior deve ser formar ortodontistas capazes de utilizar ferramentas digitais de forma esclarecida, ética, crítica e tecnicamente segura.

Conclusão

A análise da literatura científica disponível permite concluir que a inteligência artificial constitui uma ferramenta promissora no âmbito do diagnóstico ortodôntico, apresentando vantagens significativas ao nível da rapidez de processamento, da reprodutibilidade e da automatização de tarefas padronizadas. Em aplicações como o traçado cefalométrico, a segmentação anatômica e a análise imagiológica, diversos estudos demonstram níveis de desempenho comparáveis aos obtidos por profissionais experientes, contribuindo para a otimização dos fluxos de trabalho clínicos.

Contudo, a evidência atualmente disponível indica que estas tecnologias apresentam limitações importantes quando aplicadas a contextos clínicos complexos. O diagnóstico ortodôntico não depende exclusivamente da interpretação de dados imagiológicos, exigindo igualmente a integração de fatores biológicos, funcionais, psicológicos e sociais que permanecem fortemente dependentes do julgamento clínico. Neste sentido, a inteligência artificial não deve ser encarada como um substituto do médico dentista, mas como uma ferramenta complementar de apoio à decisão clínica.

A implementação destas tecnologias levanta igualmente desafios éticos, legais e profissionais relacionados com a transparência dos algoritmos, a proteção dos dados dos pacientes, os enviesamentos dos modelos e a definição de responsabilidades clínicas. A manutenção de modelos de supervisão humana, nomeadamente através da abordagem Human-in-the-Loop, assume um papel fundamental para garantir a segurança, a fiabilidade e a responsabilidade do processo diagnóstico.

Por fim, a evolução contínua da inteligência artificial, incluindo o desenvolvimento de sistemas generativos e de soluções cada vez mais personalizadas, poderá ampliar significativamente as suas aplicações na Ortodontia. Contudo, a adoção destas tecnologias deverá ser acompanhada por uma avaliação científica rigorosa, formação adequada dos profissionais e

atualização dos enquadramentos éticos e regulamentares. O futuro da Ortodontia parece, assim, orientar-se para uma integração equilibrada entre inovação tecnológica e julgamento clínico, preservando a individualização do tratamento e os princípios fundamentais da prática médico-dentária.

Bibliografia

A Alzahrani, F. A., Alolaiwi, L., & Alshammari, S. A. (2025). Shaping the Future of Dental Education: A Scoping Review of Artificial Intelligence (AI) Integration Strategies. *Cureus*, 17(5), e84921. <https://doi.org/10.7759/cureus.84921>

Allen, J. W., Wilkinson, D., & Savulescu, J. (2026). When Is It Safe to Introduce an AI System Into Healthcare? A Practical Decision Algorithm for the Ethical Implementation of Black-Box AI in Medicine. *Bioethics*, 40(1), 61–72. <https://doi.org/10.1111/bioe.70032>

Amann, J., Blasimme, A., Vayena, E., Frey, D., Madai, V. I., & Precise4Q consortium (2020). Explainability for artificial intelligence in healthcare: a multidisciplinary perspective. *BMC medical informatics and decision making*, 20(1), 310. <https://doi.org/10.1186/s12911-020-01332-6>

Ardila, C. M., Pineda-Vélez, E., & Vivares Builes, A. M. (2025). Integrating Artificial Intelligence into Orthodontic Education: A Systematic Review and Meta-Analysis of Clinical Teaching Application. *Journal of clinical medicine*, 14(15), 5487. <https://doi.org/10.3390/jcm14155487>

Awad, D., Reinert, S., & Kluba, S. (2022). Accuracy of three-dimensional soft-tissue prediction considering the facial aesthetic units using a virtual planning system in orthognathic surgery. *Journal of Personalized Medicine*, 12(9), 1379. <https://doi.org/10.3390/jpm12091379>

Bichu, Y. M., Hansa, I., Bichu, A. Y., Premjani, P., Flores-Mir, C., & Vaid, N. R. (2021). Applications of artificial intelligence and machine learning in orthodontics: A scoping review. *Progress in Orthodontics*, 22(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s40510-021-00361-9>

Bor, S., Ciğerim, S. Ç., & Kotan, S. (2024). Comparison of AI-assisted cephalometric analysis and orthodontist-performed digital tracing analysis. *Progress in orthodontics*, 25(1), 41. <https://doi.org/10.1186/s40510-024-00539-x>

Bulatova, G., Kusnoto, B., Grace, V., Tsay, T. P., Avenetti, D. M., & Sanchez, F. J. (2021). Assessment of automatic cephalometric landmark identification using artificial intelligence. *Orthodontics & Craniofacial Research*, 24(S2), 37–42. <https://doi.org/10.1111/ocr.12542>

Buçinca, T., Malaya, M. B., & Gajos, K. Z. (2021). To trust or to think: cognitive forcing functions can reduce overreliance on AI in AI-assisted decision-making. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 5(CSCW1), 1–21. <https://doi.org/10.1145/3449287>

Challen, R., Denny, J., Pitt, M., Gompels, L., Edwards, T., & Tsaneva-Atanasova, K. (2019). Artificial intelligence, bias and clinical safety. *BMJ Quality & Safety*, 28(3), 231–237. 10.1136/bmjqs-2018-008370

Chanmanee, P., & Nakornnoi, T. (2024). Accuracy of digital imaging software to predict soft tissue changes during orthodontic treatment. *Journal of Imaging*, 10(6), 134. <https://doi.org/10.3390/jimaging10060134>

Contaldo, M. T., Pasceri, G., Vignati, G., Bracchi, L., Triggiani, S., & Carrafiello, G. (2024). AI in Radiology: Navigating Medical Responsibility. *Diagnostics (Basel, Switzerland)*, 14(14), 1506. <https://doi.org/10.3390/diagnostics14141506>

Cui, Z., Zhang, C., & Wang, W. (2019). ToothNet: Automatic tooth instance segmentation and identification from cone beam CT images. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 6368-6377. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00653>

Di Mauro, L., Capasso, E., Tettamanti, C., Casella, C., Francaviglia, M., Volonnino, G., Rinaldi, R., Esposito, M., & Chisari, M. (2025). The role of

artificial intelligence in analyzing clinical malpractice disputes through medical record management. *Journal of forensic and legal medicine*, 115, 102941. <https://doi.org/10.1016/j.jflm.2025.102941>

Ellakany, P., Tauqir, S., Ali, S., & Mikhail, S. S. (2025). Artificial intelligence usage among dental students/dentists of different educational level: a multi-country survey. *BMC oral health*, 26(1), 81. <https://doi.org/10.1186/s12903-025-07476-z>

Fawaz, P., El Sayegh, P., & Vande Vannet, B. (2025). Artificial intelligence in revolutionizing orthodontic practice. *World journal of methodology*, 15(3), 100598. <https://doi.org/10.5662/wjm.v15.i3.100598>

Goffin T. (2025). Does AI in Healthcare Need an Editor-in-Chief? A Leading Example of True Human Oversight. *European journal of health law*, 32(5), 579–602. <https://doi.org/10.1163/15718093-12423581>

Gupta, S., Shetty, S., Natarajan, S., Nambiar, S., Mv, A., & Agarwal, S. (2024). A comparative evaluation of concordance and speed between smartphone app-based and artificial intelligence web-based cephalometric tracing software with the manual tracing method: A cross-sectional study. *Journal of clinical and experimental dentistry*, 16(1), e11–e17. <https://doi.org/10.4317/jced.60899>

Hadzic, A., Urschler, M., Press, J. N. A., Riedl, R., Rugani, P., Štern, D., & Kirnbauer, B. (2023). Evaluating a Periapical Lesion Detection CNN on a Clinically Representative CBCT Dataset—A Validation Study. *Journal of Clinical Medicine*, 13(1), 197. <https://doi.org/10.3390/jcm13010197>

Hendrickx, J., Gracea, R. S., Vanheers, M., Winderickx, N., Preda, F., Shujaat, S., & Jacobs, R. (2024). Can artificial intelligence-driven cephalometric analysis replace manual tracing? A systematic review and meta-analysis. *European Journal of Orthodontics*, 46(4), cjae029. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjae029>

Kardach, H., Szponar-Żurowska, A., & Biedziak, B. (2023). A comparison of teeth measurements on plaster and digital models. *Journal of Clinical Medicine*, 12(3), 943. <https://doi.org/10.3390/jcm12030943>

Kazimierczak, N., Kazimierczak, W., Serafin, Z., Nowicki, P., Nożewski, J., & Janiszewska-Olszowska, J. (2024). AI in Orthodontics: Revolutionizing Diagnostics and Treatment Planning-A Comprehensive Review. *Journal of clinical medicine*, 13(2), 344. <https://doi.org/10.3390/jcm13020344>

Khullar, D., Casalino, L. P., Qian, Y., Lu, Y., Krumholz, H. M., & Aneja, S. (2022). Perspectives of patients about artificial intelligence in health care. *JAMA Network Open*, 5(5), e2210309. <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2022.10309>

Kim, H., Shim, E., Park, J., Kim, Y. J., Lee, U., & Kim, I. (2020). Web-based fully automated cephalometric analysis by deep learning. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 194, 105513. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2020.105513>

Kim, S. H., Schramm, S., Riedel, E. O., Schmitzer, L., Rosenkranz, E., Kertels, O., Bodden, J., Paprottka, K., Sepp, D., Renz, M., Kirschke, J., Baum, T., Maegerlein, C., Boeckh-Behrens, T., Zimmer, C., Wiestler, B., & Hedderich, D. M. (2025). Automation bias in AI-assisted detection of cerebral aneurysms on time-of-flight MR angiography. *La Radiologia medica*, 130(4), 555–566. <https://doi.org/10.1007/s11547-025-01964-6>

Kocak, B., & Cuocolo, R. (2026). Human-AI interaction and collaboration in radiology: from conceptual frameworks to responsible implementation. *Diagnostic and interventional radiology (Ankara, Turkey)*, 10.4274/dir.2026.263780. Advance online publication. <https://doi.org/10.4274/dir.2026.263780>

Kostov, I. I., & Yordanova, G. R. (2025). Attitudes of dentists and patients towards the introduction of artificial intelligence in dentistry. *Journal of Medicine and Life*, 18(5), 472–477. <https://doi.org/10.25122/jml-2024-0382>

Kunz, F., Stellzig-Eisenhauer, A., Zeman, F., & Boldt, J. (2020). Artificial intelligence in orthodontics : Evaluation of a fully automated cephalometric analysis using a customized convolutional neural network. *Journal of orofacial orthopedics*, 81(1), 52–68. <https://doi.org/10.1007/s00056-019-00203-8>

Kuwada, C., Arijii, Y., Nishiyama, M., Funakoshi, T., Fukuda, M., Kise, Y., ... & Arijii, E. (2020). Deep learning systems for detecting and classifying the presence of impacted supernumerary teeth in the maxillary incisor region on panoramic radiographs. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology*, 130(4), 429–435. <https://doi.org/10.1016/j.oooo.2020.04.813>

Köz, Ş., Yaman, M., & Uslu-Akçam, Ö. (2024). Comparison of artificial intelligence supported and app-aided cephalometric analysis. *Essentials of Dentistry*, 3(2), 56-62. <https://doi.org/10.5152/EssentDent.2024.24011>

Li, P., Kong, D., Tang, T., Su, D., Yang, P., Wang, H., Zhao, Z., & Liu, Y. (2019). Orthodontic treatment planning based on artificial neural networks. *Scientific Reports*, 9(1), Article 2037. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38439-w>

Lima, K. da C., Aguiar, H. C., Szonyi, V., Fernandes, M. H., Tirapelli, C., & Grosogoeat, B. (2026). Patient perception of the use of artificial intelligence in dentistry: a systematic review and single-arm meta-analysis. *Digital Dentistry Journal*, 3(1), 100071. <https://doi.org/10.1016/j.ddj.2026.100071>

Ma, J., Schneider, L., Lapuschkin, S., Achibat, R., Duchrau, M., Krois, J., Schwendicke, F., & Samek, W. (2022). Towards trustworthy AI in dentistry. *Journal of Dental Research*, 101(11), 1263–1268. <https://doi.org/10.1177/00220345221106086>

Marradi, F., Staderini, E., Zimbalatti, M. A., Rossi, A., Grippaudo, C., & Gallenzi, P. (2020). How to Obtain an Orthodontic Virtual Patient through Superimposition of Three-Dimensional Data: A Systematic Review. *Applied Sciences*, 10(15), 5354. <https://doi.org/10.3390/app10155354>

Meriç, P., & Naoumova, J. (2020). Web-based Fully Automated Cephalometric Analysis: Comparisons between App-aided, Computerized, and Manual Tracings. *Turkish journal of orthodontics*, 33(3), 142–149. <https://doi.org/10.5152/TurkJOrthod.2020.20062>

Mohammad-Rahimi, H., Nadimi, M., Rohban, M. H., Shamsoddin, E., Lee, V. Y., & Motamedian, S. R. (2021). Machine learning and orthodontics, current trends and the future opportunities: A scoping review. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics*, 160(2), 170–192.e4. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2021.02.013>

Mourgues, T., Maniere-Ezvan, A., & Scolozzi, P. (2024). A prospective longitudinal observational study on the emotional impact of AI-simulated smiles on orthodontic patient motivation. *International Journal of Dentistry*, 2024, 8425551. <https://doi.org/10.1155/ijod/8425551>

Mourgues, T., Gonzalez-Olmo, M. J., Ghislanzoni, L. H., Otel, A., & Romero-Maroto, M. (2026). A prospective longitudinal observational study on the emotional impact of AI-simulated smiles on orthodontic patient motivation. *International Journal of Dentistry*, 2026, Article 8425551. <https://doi.org/10.1155/ijod/8425551>

Norman, N. H., Rosli, M. M., Al-Jaf, N. M., Mohammad, N., Azizan, A., & Yusof, M. Y. P. M. (2025). Integration of artificial intelligence in orthodontic imaging: A bibliometric analysis of research trends and applications. *Imaging science in dentistry*, 55(2), 151–164. <https://doi.org/10.5624/isd.20240237>

Olejnuk, A., Verstraete, L., Croonenborghs, T. M., & Politis, C. (2024). The accuracy of three-dimensional soft tissue simulation in orthognathic surgery—A systematic review. *Journal of Imaging*, 10(5), 119.

<https://doi.org/10.3390/jimaging10050119>

Park, Y. S., Choi, J. H., Kim, Y., Choi, S. H., Lee, J. H., Kim, K. H., & Chung, C. J. (2022). Deep Learning-Based Prediction of the 3D Postorthodontic Facial Changes. *Journal of dental research*, 101(11), 1372–1379.

<https://doi.org/10.1177/00220345221106676>

Park, Y. S., Choi, J. H., Kim, Y., Choi, S. H., Lee, J. H., Kim, K. H., & Chung, C. J. (2022). Deep learning–based prediction of the 3D postorthodontic facial changes. *Journal of Dental Research*, 101(11), 1372–1379.

<https://doi.org/10.1177/00220345221106676>

Pouliezou, I., Gravia, A. P., & Vasoglou, M. (2024). Digital Model in Orthodontics: Is It Really Necessary for Every Treatment Procedure? A Scoping Review. *Oral*, 4(2), 243-262. <https://doi.org/10.3390/oral4020020>

Preda, F., Nogueira-Reis, F., Stanciu, E. M., Smolders, A., Jacobs, R., & Shaheen, E. (2024). Validation of automated registration of intraoral scan onto cone beam computed tomography for an efficient digital dental workflow. *Journal of Dentistry*, 149, 105282.

Preda, F., Elshazly, N., & Jacobs, R. (2025). AI-enhanced orthodontic treatment planning - a scoping review on evidence-based clinical application with commercial software overview. *Journal of dentistry*, 163, 106112.

<https://doi.org/10.1016/j.jdent.2025.106112>

Qian, Y., Qiao, H., Wang, X., Zhan, Q., Li, Y., Zheng, W., & Li, Y. (2022). Comparison of the accuracy of 2D and 3D cephalometry: a systematic review and meta-analysis. *Aust Orthod J*, 38(1), 130-44.

Rahim, A., Khatoon, R., Khan, T. A., Syed, K., Khan, I., Khalid, T., & Maqsood, A. (2024). Artificial intelligence-powered dentistry: Probing the potential,

challenges, and ethicality of artificial intelligence in dentistry. *Digital Health*, 10, 20552076241291345. <https://doi.org/10.1177/20552076241291345>

Rosenbacke, R., Melhus, Å., McKee, M., & Stuckler, D. (2024). How Explainable Artificial Intelligence Can Increase or Decrease Clinicians' Trust in AI Applications in Health Care: Systematic Review. *JMIR AI*, 3, e53207. <https://doi.org/10.2196/53207>

Saini, R. S., Kaur, K., Gurumurthy, V., Binduhayyim, R. I. H., Kaushik, A., Kuruniyan, M. S., Alarcón-Sánchez, M. A., & Heboyan, A. (2025). Impact of artificial intelligence-based digital smile design on patient and clinician satisfaction and facial esthetic outcomes: A systematic review and meta-analysis. *Digital health*, 11, 20552076251388392. <https://doi.org/10.1177/20552076251388392>

Schwendicke, F., Chaurasia, A., Arsiwala, L., Lee, J. H., Elhennawy, K., Jost-Brinkmann, P. G., Demarco, F., & Krois, J. (2021). Deep learning for cephalometric landmark detection: systematic review and meta-analysis. *Clinical oral investigations*, 25(7), 4299–4309. <https://doi.org/10.1007/s00784-021-03990-w>

Schwendicke, F., Samek, W., & Krois, J. (2020). Artificial Intelligence in Dentistry: Chances and Challenges. *Journal of Dental Research*, 99(7), 769–774. <https://doi.org/10.1177/0022034520915714>

Shaheen, E., Leite, A., Alqahtani, K. A., Smolders, A., Van Gerven, A., Willems, H., & Jacobs, R. (2021). A novel deep learning system for multi-class tooth segmentation and classification on cone beam computed tomography. A validation study. *Journal of dentistry*, 115, 103865. <https://doi.org/10.1016/j.ident.2021.103865>

Thurzo, A., Strunga, M., Urban, R., Surovková, J., & Afrashtehfar, K. I. (2022). Where is the artificial intelligence applied in dentistry? A systematic review and

literature analysis. Healthcare, 10(7), 1269.

<https://doi.org/10.3390/healthcare10071269>

Thurzo, A., Strunga, M., Urban, R., Surovková, J., & Afrashtehfar, K. I. (2023). Impact of Artificial Intelligence on Dental Education: A Review and Guide for Curriculum Update. Education Sciences, 13(2), 150.

<https://doi.org/10.3390/educsci13020150>

Tun, H. M., Rahman, H. A., Naing, L., & Malik, O. A. (2025). Trust in Artificial Intelligence-Based Clinical Decision Support Systems Among Health Care Workers: Systematic Review. Journal of medical Internet research, 27, e69678.

<https://doi.org/10.2196/69678>

Zhang, J., & Zhang, Z. M. (2023). Ethics and governance of trustworthy medical artificial intelligence. BMC medical informatics and decision making, 23(1), 7.

<https://doi.org/10.1186/s12911-023-02103-9>