

RESSALVA

Atendendo a solicitação do(a) autor(a), o texto completo desse trabalho será disponibilizado no repositório a partir de 26/03/2028.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de São José dos Campos
Instituto de Ciência e Tecnologia

NICOLE BERTON DE MOURA

**ANÁLISE DA CONCORDÂNCIA DE SOFTWARES DE
INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA DETECÇÃO DE CÁLCULO
DENTÁRIO E LESÕES CARIOSAS EM RADIOGRAFIAS
BITEWING: um estudo observacional retrospectivo e cego**

NICOLE BERTON DE MOURA

**ANÁLISE DA CONCORDÂNCIA DE SOFTWARES DE INTELIGÊNCIA
ARTIFICIAL NA DETECÇÃO DE CÁLCULO DENTÁRIO E LESÕES CARIOSAS
EM RADIOGRAFIAS BITEWING: um estudo observacional retrospectivo e cego**

Tese apresentada ao Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de São José dos Campos, como parte dos requisitos para obtenção do título de DOUTORA, pelo Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS APLICADAS À SAÚDE BUCAL.

Área: Periodontia. Linha de pesquisa: Patogenia, imaginologia e terapias em odontologia.

Orientadora: Prof. Assoc. Sérgio Lúcio Pereira de Castro Lopes

São José dos Campos

2026

Instituto de Ciência e Tecnologia [internet]. Normalização de tese e dissertação [acesso em 2026]. Disponível em <http://www.ict.unesp.br/biblioteca/normalizacao>

Apresentação gráfica e normalização de acordo com as normas estabelecidas pelo Serviço de Normalização de Documentos da Seção Técnica de Referência e Atendimento ao Usuário e Documentação (STRAUD).

Moura, Nicole Berton de

Análise da concordância de softwares de inteligência artificial na detecção de cálculo dentário e lesões cariosas em radiografias bitewing: um estudo observacional retrospectivo e cego. / Nicole Berton de Moura. - São José dos Campos : [s.n.], 2026.

52 f. : il.

Tese (doutorado) - Pós-Graduação em Ciências Aplicadas à Saúde Bucal - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, 2026.

Orientador: Sérgio Lúcio Pereira de Castro Lopes.

1. Inteligência Artificial. 2. Radiografia Interproximal. 3. Cárie Dentária. 4. Cálculos Dentários. 5. Software. I. Lopes, Sérgio Lúcio Pereira de Castro, orient. II. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos. III. Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho' - UNESP. IV. Universidade Estadual Paulista (UNESP). V. Título.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O impacto potencial desta pesquisa consiste na possibilidade de oferecer evidências sobre o desempenho de diferentes softwares de inteligência artificial odontológicos como ferramentas diagnósticas complementares para a detecção de lesões cariosas e cálculo dental em radiografias *bitewing*. Ao analisar medidas de acurácia diagnóstica e compará-las à avaliação subjetiva de clínicos gerais, utilizando o julgamento de radiologistas especialistas como referência, este estudo poderá esclarecer se as tecnologias de inteligência artificial (IA) realmente podem beneficiar o clínico geral em sua rotina – especialmente aqueles que enfrentam desafios na interpretação radiográfica. Assim, os resultados poderão indicar se a IA auxilia o processo diagnóstico e contribui para uma tomada de decisão clínica mais acurada.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The potential impact of this research lies in its ability to provide evidence on the performance of different dental artificial intelligence software as complementary diagnostic tools for detecting dental caries and dental calculus in bitewing radiographs. By analyzing diagnostic accuracy measures and comparing them with the subjective evaluations of general dentists, taking the assessments of dentomaxillofacial radiologists as the reference standard, this study aims to clarify whether AI technologies can truly benefit general clinicians in their daily practice, particularly those who face challenges in radiographic interpretation. Thus, the results may indicate whether AI supports the diagnostic process and contributes to more accurate clinical decision-making.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Assoc. Sérgio Lúcio Pereira de Castro Lopes (Orientador)

Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

Prof. Titular Maria Aparecida Neves Jardini

Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

Prof. Dra. Camilla Magnoni Moretto Nunes

Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

Prof. Dra. Elis Andrade de Lima Zutin

Universidade de Mogi das Cruzes

UMC

Campus de Mogi das Cruzes

Prof. Dra. Camila Lopes Ferreira

Universidade de Taubaté

UNITAU

Campus de Taubaté

São José dos Campos, 06 de março de 2026.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Deus e a mim mesma.

A Deus, por cuidar de mim todos os dias, por colocar as pessoas certas no meu caminho e prover tudo para a realização deste trabalho.

A mim mesma, pela determinação – na busca por oportunidades e por ter persistido diante dos desafios – pela coragem, resiliência e superação ao longo dessa jornada.

A frase *“Trabalhe como se tudo dependesse de você e ore como se tudo dependesse de Deus”* nunca fez tanto sentido.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que me sustentou, me capacitou e abriu todas as portas para que esse trabalho pudesse ser concretizado, incluindo as portas da UNC, onde vivi o ano mais incrível da minha vida.

Ao meu marido, Lucas, por todo apoio, amor, paciência e compreensão em todos os momentos.

Aos meus pais Marcio e Dora, por todo apoio, amor, incentivo e por não medirem esforços para que eu pudesse alcançar todos os meus objetivos e estar aqui hoje. Aos meus irmãos, Camilla e Pietro, por todo carinho, incentivo e por torcerem genuinamente por mim.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, por meio da bolsa Processo nº 88887.201548/2025-00, e ao Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior – CAPES Print (Processo nº 88887.936436/2024-00), que possibilitaram a realização deste trabalho.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Instituto de Ciência e Tecnologia – Unesp, por todos estes anos de aprendizado e acolhimento, que me trouxeram até aqui.

À University of North Carolina Adams School of dentistry (UNC - Chapel Hill) – que disponibilizou os recursos necessários para a realização desta pesquisa e me possibilitou muitos aprendizados e realizações – profissionais e pessoais – durante a minha vivência nos EUA.

À Samira e Carlos Camargo, que me acolheram com tanto carinho na minha jornada no exterior.

À Cristiane Bonanato, pela amizade, carinho e cuidado em todos os momentos (antes mesmo de chegar na Carolina do Norte) e pela parceria e dedicação neste trabalho.

Expresso, ainda, a minha mais sincera gratidão e carinho ao meu orientador, Prof. Dr. Sérgio Lúcio Pereira de Castro Lopes, pelo imenso incentivo, paciência, orientação e dedicação ao longo deste percurso acadêmico.

Ao programa de pós-graduação em Ciências Aplicadas à Saúde Bucal.

Aos docentes de periodontia do ICT-UNESP, em especial aos Profs. Emanuel, Ucha, Andréa e Camilla, por toda paciência, dedicação, ensinamentos e contribuição na minha formação.

À minha querida banca (Profs. Ucha, Camilla Moretto, Camila Lopes e Elis) que – além do meu querido orientador, ao qual sou profundamente grata – é formada por mulheres fortes, competentes e batalhadoras, que me inspiram todos os dias. Agradeço desde já pela atenção, disponibilidade e contribuições neste trabalho.

Aos meus colegas e amigos de pós-graduação – tanto os que já concluíram quanto os que seguem por aqui nessa jornada – por partilharem comigo das alegrias, tristezas, desafios e superações ao longo do caminho.

RESUMO

Moura NB. Análise da concordância de softwares de inteligência artificial na detecção de cálculo dentário e lesões cariosas em radiografias bitewing: um estudo observacional retrospectivo e cego [tese]. São José dos Campos (SP): Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, 2026.

O objetivo deste estudo foi avaliar a concordância entre cirurgiões-dentistas clínicos gerais (CG) e softwares de inteligência artificial (IA) na detecção de lesões cariosas e cálculo dentário em radiografias interproximais, utilizando como padrão-ouro o consenso entre radiologistas dentomaxilofaciais. Foram selecionadas 542 radiografias oriundas de arquivo. As imagens foram avaliadas por três grupos: CG, composto por dois CG; IA, composto pelos softwares Diagnocat, Denti.AI e DIO; e R, formado por três especialistas em Radiologia Odontológica. A partir dessas avaliações, foram calculados os valores de concordância de cada avaliador (CG e softwares de IA) em relação ao padrão-ouro, bem como a concordância intra-grupo entre os softwares. Além disso, foram estimadas as medidas de acurácia diagnóstica, incluindo sensibilidade, especificidade, valor preditivo positivo (VPP) e valor preditivo negativo (VPN). A concordância entre os três radiologistas variou de 90% a 92%, com valores de Kappa entre 0,34 e 0,63, indicando concordância de fraca a moderada, porém estatisticamente significativa ($p < 0,001$). Para lesões cariosas secundárias, CG e softwares apresentaram especificidade elevada (94–97%), porém a sensibilidade foi mais baixa para os CG (43–47%) e para o DIO (40%), intermediária para o Denti.AI e superior no Diagnocat (81%). O VPN foi elevado em ambos os grupos (98–99%) e o VPP foi baixo (32–37%), indicando tendência a falsos positivos. Para lesões cariosas primárias proximais, CG e DIO mantiveram alta especificidade (97–98%) e sensibilidade reduzida (39–67%). Já os softwares Diagnocat e Denti.AI mostraram desempenho superior, com sensibilidades de 86-93% e 80-87%, respectivamente, além de alta especificidade (86-95%). O VPP foi limitado para CG e softwares (20–63%). Quanto ao cálculo dental, tanto os CG quanto Diagnocat demonstraram alta especificidade (91–97%), sendo que este apresentou a maior sensibilidade (96%). Os valores de VPN foram altos em ambos os grupos (98–100%), enquanto o VPP apresentou maior variação, sendo de 64–76% para os CG e 52% para o Diagnocat. Nossos resultados demonstram que o uso da IA pode contribuir para a otimização do processo diagnóstico e da tomada de decisão clínica, especialmente no caso de lesões cariosas que poderiam passar despercebidas, desde que utilizada com cautela e sempre associada ao julgamento clínico.

Palavras-chave: Inteligência Artificial; Radiografia Interproximal; Cárie Dentária; Cálculos Dentários; Software.

ABSTRACT

Moura NB. *Concordance Analysis of Artificial Intelligence Software in the Detection of Dental Calculus and Caries in Bitewing radiographs: A Retrospective Observational Blind Study [dissertation]*. São José dos Campos (SP): São Paulo State University (Unesp), Institute of Science and Technology; 2026.

The aim of this study was to assess the agreement between general dentists (GD) and artificial intelligence (AI) software in the detection of dental caries and calculus on bitewing radiographs, with the consensus of dentomaxillofacial radiologists established as the gold standard. A total of 542 images were selected and evaluated by three groups: GD, consisting of two general dentists; AI, comprising three dental software programs (Diagnocat, Denti.AI, and DIO); and R, composed of three specialists in Oral and Maxillofacial Radiology. Based on these assessments, agreement values between each evaluator (GD and AI software) and the gold standard were calculated, along with intra-group agreement among the AI software. Diagnostic accuracy measures — including sensitivity, specificity, positive predictive value (PPV), and negative predictive value (NPV) — were also estimated. Agreement among the radiologists ranged from 90% to 92%, with Kappa values between 0.34 and 0.63, indicating weak to moderate yet statistically significant agreement ($p < 0.001$). For secondary caries, both GD and AI software demonstrated high specificity (94–97%), although sensitivity was lower for GD (43–47%) and DIO (40%), intermediate for Denti.AI, and higher for Diagnocat (81%). NPV was elevated across all groups (98–99%), whereas PPV was low (32–37%), reflecting a tendency toward false-positive results. For proximal primary caries, GD and DIO again exhibited high specificity (97–98%) but reduced sensitivity (40–60%). In contrast, Diagnocat and Denti.AI showed superior performance, with sensitivities of 86–93% and 80–87%, respectively, alongside high specificity (86–95%). PPV remained limited for both GD and AI software (20–63%). Regarding dental calculus, both GD and Diagnocat demonstrated high specificity (91–97%), with Diagnocat achieving the highest sensitivity (96%). NPV values were consistently high for both groups (98–100%), while PPV varied more substantially, ranging from 64–76% for GD and 52% for Diagnocat. Collectively, these findings indicate that AI may enhance diagnostic processes and clinical decision-making — particularly in identifying dental caries that might otherwise be missed by clinicians — as long as it is supported by clinical judgment.

Keywords: Artificial intelligence; bitewing radiographs; dental caries; dental calculus; software.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IA	Inteligência Artificial
BW	<i>Bitewing</i>
CG	Clínicos-Gerais
DL	Deep Learning
ML	Machine Learning
R	Radiologistas
RNC	Rede Neurais Convolucionais
RNP	Redes Neurais Probabilísticas
TC	Tomografia Computadorizada
TCFC	Tomografia Computadorizada de Feixe cônico
VPN	Valor Preditivo Negativo
VPP	Valor Preditivo Positivo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1 Aplicações de IA na área de Endodontia.....	16
2.2 Aplicações de IA na área de Dentística	17
2.3 Aplicações de IA na área de Cirurgia Oral e Maxilofacial	18
2.4 Aplicações de IA na área de Periodontia.....	19
2.5 Aplicações de IA na área de Ortodontia	20
3 PROPOSIÇÃO	21
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	22
4.1 Ética e desenho do estudo	22
4.2 Critérios de Elegibilidade.....	22
4.3 Amostra e metodologia de análise das imagens.....	22
4.4 Calibração dos examinadores	26
4.5 Análise de predição de cárie e cálculo dentário.....	27
4.6 Análise estatística	28
5 RESULTADO	29
6 DISCUSSÃO	39
7 CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS.....	45
ANEXO.....	51

1 INTRODUÇÃO

O relatório global da OMS (2022) estimou que as doenças orais afetam aproximadamente 3,5 bilhões de pessoas em todo o mundo, sendo a doença periodontal e a cárie dentária as mais prevalentes (Romandini et al., 2023). Embora ambos os distúrbios sejam multifatoriais e mediados por biofilmes, a patogênese de ambas as condições difere entre si. (Sabharwa et al., 2021). A cárie dentária pode ser caracterizada como uma doença modulada pela dieta, não transmissível e dinâmica, que resulta na desmineralização tecidos duros dentários (Machiulskiene et al., 2020); já a periodontite é definida como uma condição inflamatória crônica associada a biofilmes disbióticos e caracterizada pela destruição progressiva dos tecidos de suporte dos dentes (Tonetti et al., 2018).

Ambas as doenças representam preocupações significativas de saúde pública e podem levar a graves implicações econômicas. Além disso, podem resultar em perda dentária, comprometendo a qualidade de vida e a autoestima dos pacientes (Rosing et al., 2023). Portanto, a detecção precoce de ambas as condições é imprescindível para um melhor prognóstico, possibilitando um plano de tratamento minimamente invasivo (Hung et al., 2020; Tariq et al., 2023). Historicamente, o diagnóstico da cárie tem sido realizado principalmente por meio da inspeção visual de alterações na estrutura do esmalte (Chaves et al., 2024). O diagnóstico da periodontite, por outro lado, além da presença de perda de inserção periodontal, está associado a manifestações clínicas da inflamação gengival, como o sangramento à sondagem, bem como à identificação de biofilme e depósitos de cálculo (Papapanou et al., 2018).

Além dos exames clínicos, o exame radiográfico é amplamente utilizado como ferramenta complementar para o diagnóstico de diversas condições. Na prática clínica, os radiologistas avaliam e interpretam visualmente as imagens, mas esse processo requer dentistas experientes e algumas vezes, pode ser demorado e subjetivo, o que aumenta o risco de diagnósticos incorretos (Hedge et al., 2025; Radha et al., 2023). Diante desses desafios, pesquisadores têm desenvolvido inovações tecnológicas constantes para aprimorar a prática clínica diária. Nesse contexto, a Inteligência Artificial (IA) destaca-se, principalmente com a digitalização da

odontologia (Ossowska et al., 2022).

O termo "inteligência artificial" (IA) foi introduzido em 1956 por John McCarthy durante a conferência de Dartmouth, que reuniu grandes pesquisadores para explorar a ideia de que máquinas poderiam ser capazes de simular a inteligência humana e realizar ações de forma autônoma, sem intervenção direta do ser humano (Patil et al., 2022). A IA é considerada como um ramo das ciências da computação alicerçada em diversas disciplinas científicas como lógica, estatística, psicologia cognitiva, teoria da decisão, neurociência, linguística, cibernética e engenharia (Howard, 2019; Shan et al., 2020). Esses fundamentos sustentam o desenvolvimento de sistemas capazes de imitar o pensamento humano, caracterizado pela capacidade de aprender, a tomar decisões e resolver problemas (Dhopte et al. 2023; Hung et al., 2020; Khanagar et al., 2021).

Atualmente, a IA está presente no cotidiano por meio de diversos produtos e serviços, como sistemas de personalização de experiências de usuários, exemplificados pela Netflix e assistentes virtuais, como a Siri e a Alexa (Vodanović et al., 2023). Além disso, a IA tem impactado significativamente a área da saúde, com o desenvolvimento de sistemas inteligentes para cirurgias assistidas e vídeo-cirurgias (Carrillo-Perez et al., 2022). Dessa forma, observa-se que a IA tem produzido avanços notáveis em diferentes campos, especialmente na medicina e na odontologia, que seguem recebendo contínuos investimentos em pesquisa.

Na radiologia dentomaxilofacial, uma grande quantidade de dados pode ser assimilada a partir de técnicas de imagem de alta resolução, como radiografias e tomografia computadorizada (TC) (Radha et al., 2023). Diversas ferramentas de IA têm sido introduzidas e desenvolvidas para auxiliar os clínicos no diagnóstico e detecção de doenças, análise de imagens dentárias, avaliação dos efeitos do tratamento e previsão de prognósticos (Hung et al., 2020; Putra et al., 2022). Modelos de IA podem prever resultados a partir de dados iniciais, executando tanto tarefas simples quanto complexas em clínicas odontológicas com maior precisão, acurácia, sensibilidade e eficiência (Talpur et al., 2022).

Diversos estudos têm sido realizados com objetivo de desenvolver soluções que utilizem as mais recentes tecnologias para abordar questões relacionadas à odontologia. Várias revisões (Ahmed et al., 2022; Carrillo-Perez et al., 2021; Farajollahi et al., 2023; Hung et al., 2020; Putra et al., 2022) delinearam as diferentes aplicações

e finalidades da IA na esfera dentomaxilofacial, incluindo a classificação de sistemas de implantes dentários, avaliação de diversas patologias como tumores, cistos e lesões periapicais, análise cefalométrica, triagem de osteoporose, odontologia forense, diagnóstico de cárie dentária, detecção de cálculo e perda óssea periodontal.

Na dentística, a detecção de lesões cariosas proximais iniciais pode ser desafiadora, e a utilização de radiografias *Bitewings* (BW) na complementação do diagnóstico é considerada o padrão-ouro, sendo uma técnica amplamente empregada na prática diária (Mertens et al., 2021). Com o advento da IA, muitos modelos digitais podem auxiliar na detecção de lesões cariosas com mais precisão e consistência, especialmente em estágios iniciais, mesmo antes que sinais visíveis se tornem aparentes ao olho humano (Anil et al., 2023). Uma revisão sistemática recente e meta-análise (Ammar et al., 2024) revelou que o uso de modelos de IA para a detecção de lesões cariosas em geral pode oferecer maior acurácia do que o uso apenas de radiografia intraoral. A maioria dos estudos incluídos relatou modelos de IA com alta acurácia ($\geq 80\%$), o que está de acordo com uma revisão anterior (Mohammad-Rahimi et al., 2022).

Na periodontia, as radiografias panorâmicas, periapicais e BW são amplamente utilizadas para auxiliar no diagnóstico de problemas periodontais e prever patologias (Saylan et al., 2023). Nesse contexto, o estudo de Jundaeng et al. (2025) demonstrou que um modelo de IA foi capaz de identificar a junção cimento-esmalte, realizar a segmentação de dentes, quantificar o nível de perda óssea e classificar o prognóstico de cada elemento dentário utilizando radiografias panorâmicas. Os resultados evidenciaram que o modelo alcançou alta desempenho nas funções citadas. De maneira complementar, Krois et al. (2019) demonstraram que um outro modelo de IA apresentou habilidade similar à de cirurgiões-dentistas na avaliação da perda óssea periodontal em radiografias panorâmicas. No que se refere à acurácia na detecção de cálculo dentário em radiografias por meio de IA, há poucos estudos avaliando esse tema, o que seria de grande valia, dada sua alta prevalência na prática clínica. A detecção do cálculo radiograficamente auxiliaria na prevenção e no tratamento da doença periodontal. O potencial da IA para revolucionar a odontologia e a saúde é inegável; no entanto, a maioria das tecnologias de IA ainda está em estágio inicial (Patil et al., 2022). A literatura existente é altamente heterogênea em termos de metodologias utilizadas, e os modelos de IA variam significativamente

dependendo dos algoritmos empregados. Além disso, há uma notável carência de estudos abrangentes nessa área, sendo essencial a realização de mais pesquisas para avaliar a eficácia e a confiabilidade dos modelos de IA para a implementação clínica (Hung et al., 2020).

7 CONCLUSÃO

Os softwares DIAGNOCAT e Denti.AI demonstraram maior sensibilidade e maior equilíbrio entre as métricas diagnósticas para diagnóstico de lesões cariosas que poderiam passar despercebidas na prática clínica. Em relação ao cálculo dental, o software DIAGNOCAT mostrou alta sensibilidade e especificidade, embora tenha gerado mais falsos positivos, revelando tanto seu potencial quanto suas limitações diante de resultados positivos. Nossos resultados reforçam que a IA pode contribuir para a otimização do processo diagnóstico e da tomada de decisão, desde que utilizada com cautela e sempre associada ao julgamento clínico.

REFERÊNCIAS

- Ahmed N, Abbasi MS, Zuberi F, Qamar W, Halim MSB, Maqsood A, Alam MK. Artificial Intelligence Techniques: Analysis, Application, and Outcome in Dentistry-A Systematic Review. *Biomed Res Int.* 2021 Jun 22;2021:9751564. doi: 10.1155/2021/9751564. PMID: 34258283; PMCID: PMC8245240.
- Ammar N, Kühnisch J. Diagnostic performance of artificial intelligence-aided caries detection on bitewing radiographs: a systematic review and meta-analysis. *Jpn Dent Sci Rev.* 2024 Dec;60:128-136. doi: 10.1016/j.jdsr.2024.02.001. Epub 2024 Feb 29. PMID: 38450159; PMCID: PMC10917640.
- Anil S, Porwal P, Porwal A. Transforming Dental Caries Diagnosis Through Artificial Intelligence-Based Techniques. *Cureus.* 2023 Jul 11;15(7):e41694. doi: 10.7759/cureus.41694. PMID: 37575741; PMCID: PMC10413921.
- Aseri AA. Exploring the Role of Artificial Intelligence in Dental Implantology: A Scholarly Review. *J Pharm Bioallied Sci.* 2025 May;17(Suppl 1):S102-S104. doi: 10.4103/jpbs.jpbs_442_25. Epub 2025 Apr 9. PMID: 40511031; PMCID: PMC12156610.
- Calazans MA, Ferreira FA, Alcoforado ML, Santos AD, Pontual AD, Madeiro F: Automatic classification system for periapical lesions in cone-beam computed tomography. *Sensors (Basel).* 2022, 22:10.3390/s22176481
- Cantu AG, Gehrung S, Krois J, Chaurasia A, Rossi JG, Gaudin R, Elhennawy K, Schwendicke F. Detecting caries lesions of different radiographic extension on bitewings using deep learning. *J Dent.* 2020 Sep;100:103425. doi: 10.1016/j.jdent.2020.103425. Epub 2020 Jul 4. PMID: 32634466.
- Carrillo-Perez F, Pecho OE, Morales JC, Paravina RD, Della Bona A, Ghinea R, Pulgar R, Pérez MDM, Herrera LJ. Applications of artificial intelligence in dentistry: A comprehensive review. *J Esthet Restor Dent.* 2022 Jan;34(1):259-280. doi: 10.1111/jerd.12844. Epub 2021 Nov 29. PMID: 34842324.
- Chaves ET, Vinayahalingam S, van Nistelrooij N, Xi T, Romero VHD, Flügge T, Saker H, Kim A, Lima GDS, Loomans B, Huysmans MC, Mendes FM, Cenci MS. Detection of caries around restorations on bitewings using deep learning. *J Dent.* 2024 Apr;143:104886. doi: 10.1016/j.jdent.2024.104886. Epub 2024 Feb 9. PMID: 38342368.
- Chen CC, Wu YF, Aung LM, Lin JC, Ngo ST, Su JN, Lin YM, Chang WJ. Automatic recognition of teeth and periodontal bone loss measurement in digital radiographs using deep-learning artificial intelligence. *J Dent Sci.* 2023 Jul;18(3):1301-1309. doi: 10.1016/j.jds.2023.03.020. Epub 2023 Apr 10. PMID: 37404656; PMCID: PMC10316502.
- Chen X, Guo J, Ye J, Zhang M, Liang Y. Detection of Proximal Caries Lesions on Bitewing Radiographs Using Deep Learning Method. *Caries Res.* 2022;56(5-6):455-463. doi: 10.1159/000527418. Epub 2022 Oct 10. PMID: 36215971; PMCID: PMC9932834.

Das M, Shahnawaz K, Raghavendra K, Kavitha R, Nagareddy B, Murugesan S. Evaluating the Accuracy of AI-Based Software vs Human Interpretation in the Diagnosis of Dental Caries Using Intraoral Radiographs: An RCT. *J Pharm Bioallied Sci.* 2024 Feb;16(Suppl 1):S812-S814. doi: 10.4103/jpbs.jpbs_1029_23. Epub 2024 Feb 29. PMID: 38595404; PMCID: PMC11001121.

Dhopte A, Bagde H. Smart Smile: Revolutionizing Dentistry With Artificial Intelligence. *Cureus.* 2023 Jun 30;15(6):e41227. doi: 10.7759/cureus.41227. PMID: 37529520; PMCID: PMC10387377

Ertaş K, Pence I, Cesmeli MS, Ay ZY. Determination of the stage and grade of periodontitis according to the current classification of periodontal and peri-implant diseases and conditions (2018) using machine learning algorithms. *J Periodontal Implant Sci.* 2023 Feb;53(1):38-53. doi: 10.5051/jpis.2201060053. Epub 2022 Sep 6. PMID: 36468476; PMCID: PMC9943704.

Estai M, Tennant M, Gebauer D, Brostek A, Vignarajan J, Mehdizadeh M, Saha S. Evaluation of a deep learning system for automatic detection of proximal surface dental caries on bitewing radiographs. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol.* 2022 Aug;134(2):262-270. doi: 10.1016/j.oooo.2022.03.008. Epub 2022 Mar 18. PMID: 35534406.

Farajollahi M, Safarian MS, Hatami M, Esmaeil Nejad A, Peters OA. Applying artificial intelligence to detect and analyse oral and maxillofacial bone loss-A scoping review. *Aust Endod J.* 2023 Dec;49(3):720-734. doi: 10.1111/aej.12775. Epub 2023 Jul 13. PMID: 37439465.

Hegde S, Gao J, Cox S, Nanayakkara S, Logothetis R, Vasa R. Machine Learning Algorithms Enhance the Accuracy of Radiographic Diagnosis of Dental Caries: A Comparative Study. *Dentomaxillofac Radiol.* 2025 Jul 10:twaf053. doi: 10.1093/dmfr/twaf053. Epub ahead of print. PMID: 40638221.

Howard J. Artificial intelligence: Implications for the future of work. *Am J Ind Med.* 2019 Nov;62(11):917-926. doi: 10.1002/ajim.23037. Epub 2019 Aug 22. PMID: 31436850.

Hoyer A, Zapf A. Studies for the Evaluation of Diagnostic Tests–Part 28 of a Series on Evaluation of Scientific Publications. *Dtsch Arztebl Int.* 2021 Aug 23;118(33-34):555-560. doi: 10.3238/arztebl.m2021.0224. PMID: 34725029; PMCID: PMC8579430.

Hung K, Montalvao C, Tanaka R, Kawai T, Bornstein MM. The use and performance of artificial intelligence applications in dental and maxillofacial radiology: A systematic review. *Dentomaxillofac Radiol.* 2020 Jan;49(1):20190107. doi: 10.1259/dmfr.20190107. Epub 2019 Aug 14. PMID: 31386555; PMCID: PMC6957072.

Johari M, Esmaeili F, Andalib A, et al. Detection of vertical root fractures in intact and endodontically treated premolar teeth by designing a probabilistic neural network: an ex vivo study. *Dentomaxillofac Radiol* 2017;46:20160107.

Jundaeng J, Chamchong R, Nithikathkul C. Advanced AI-assisted panoramic radiograph analysis for periodontal prognostication and alveolar bone loss detection.

Front Dent Med. 2025 Jan 6;5:1509361. doi: 10.3389/fdmed.2024.1509361. PMID: 39917716; PMCID: PMC11797906.

Khanagar SB, Al-Ehaideb A, Maganur PC, Vishwanathaiah S, Patil S, Baeshen HA, Sarode SC, Bhandi S. Developments, application, and performance of artificial intelligence in dentistry - A systematic review. J Dent Sci. 2021 Jan;16(1):508-522. doi: 10.1016/j.jds.2020.06.019. Epub 2020 Jun 30. PMID: 33384840; PMCID: PMC7770297.

Kim BS, Yeom HG, Lee JH. Deep learning-based prediction of paresthesia after third molar extraction: A preliminary study. Diagnostics (Basel). 2021; 11: 1572.

Kim, H.; Kim, C.S.; Lee, J.M.; Lee, J.J.; Lee, J.; Kim, J.S.; Choi, S.H. Prediction of Fishman's skeletal maturity indicators using artificial intelligence. Sci. Rep. 2023, 13, 5870. (In English) [CrossRef]

Kim,H.; Shim, E.; Park, J.; Kim, Y.J.; Lee, U.; Kim, Y. Web-Based Fully Automated Cephalometric Analysis by Deep Learning. Comput. Methods Programs Biomed. 2020, 194, 105513. [CrossRef]

Krois J, Ekert T, Meinhold L, Golla T, Kharbot B, Wittemeier A,et al. Deep learning for the radiographic detection of periodontal bone loss. Sci Rep. 2019;9:8495.

Lee SJ, Poon J, Jindarojanakul A, Huang CC, Viera O, Cheong CW, Lee JD. Artificial intelligence in dentistry: Exploring emerging applications and future prospects. J Dent. 2025 Apr;155:105648. doi: 10.1016/j.jdent.2025.105648. Epub 2025 Feb 22. PMID: 39993553.

Lin TJ, Lin YT, Lin YJ, Tseng AY, Lin CY, Lo LT, Chen TY, Chen SL, Chen CA, Li KC, Abu PAR. Auxiliary Diagnosis of Dental Calculus Based on Deep Learning and Image Enhancement by Bitewing Radiographs. Bioengineering (Basel). 2024 Jul 2;11(7):675. doi: 10.3390/bioengineering11070675. PMID: 39061757; PMCID: PMC11274141.

Liu J, Zhang C, Shan Z. Application of Artificial Intelligence in Orthodontics: Current State and Future Perspectives. Healthcare (Basel). 2023 Oct 18;11(20):2760. doi: 10.3390/healthcare11202760. PMID: 37893833; PMCID: PMC10606213

Liu Y, Xia K, Cen Y, Ying S, Zhao Z. Artificial intelligence for caries detection: a novel diagnostic tool using deep learning algorithms. Oral Radiol. 2024 Jul;40(3):375-384. doi: 10.1007/s11282-024-00741-x. Epub 2024 Mar 18. PMID: 38498223.

M. Fukuda, K. Inamoto, N. Shibata et al., "Evaluation of an artificial intelligence system for detecting vertical root fracture on panoramic radiography," Oral Radiology, vol. 36, no. 4, pp. 337–343, 2020.

Machiulskiene V, Campus G, Carvalho JC, Dige I, Ekstrand KR, Jablonski-Momeni A, Maltz M, Manton DJ, Martignon S, Martinez-Mier EA, Pitts NB, Schulte AG, Splieth CH, Tenuta LMA, Ferreira Zandona A, Nyvad B. Terminology of Dental Caries and Dental Caries Management: Consensus Report of a Workshop Organized by ORCA and Cariology Research Group of IADR. Caries Res. 2020;54(1):7-14. doi: 10.1159/000503309. Epub 2019 Oct 7. PMID: 31590168..

Mertens S, Krois J, Cantu AG, Arsiwala LT, Schwendicke F. Artificial intelligence for caries detection: Randomized trial. *J Dent*. 2021 Dec;115:103849. doi: 10.1016/j.jdent.2021.103849. Epub 2021 Oct 14. PMID: 34656656.

Mohammad-Rahimi H, Motamedian SR, Rohban MH, Krois J, Uribe SE, Mahmoudinia E, et al. Deep learning for caries detection: a systematic review. *J Dent* 2022;122:104115. <https://doi.org/10.1016/J.JDENT.2022.104115>.

Ossowska A, Kusiak A, Świetlik D. Artificial Intelligence in Dentistry-Narrative Review. *Int J Environ Res Public Health*. 2022 Mar 15;19(6):3449. doi: 10.3390/ijerph19063449. PMID: 35329136; PMCID: PMC8950565.

Papapanou PN, Sanz M, Buduneli N, Dietrich T, Feres M, Fine DH, Flemmig TF, Garcia R, Giannobile WV, Graziani F, Greenwell H, Herrera D, Kao RT, Kebschull M, Kinane DF, Kirkwood KL, Kocher T, Kornman KS, Kumar PS, Loos BG, Machtei E, Meng H, Mombelli A, Needleman I, Offenbacher S, Seymour GJ, Teles R, Tonetti MS. Periodontitis: Consensus report of workgroup 2 of the 2017 World Workshop on the Classification of Periodontal and Peri-Implant Diseases and Conditions. *J Clin Periodontol*. 2018 Jun;45 Suppl 20:S162-S170. doi: 10.1111/jcpe.12946. PMID: 29926490.

Patil S, Albogami S, Hosmani J, Mujoo S, Kamil MA, Mansour MA, Abdul HN, Bhandi S, Ahmed SSSJ. Artificial Intelligence in the Diagnosis of Oral Diseases: Applications and Pitfalls. *Diagnostics (Basel)*. 2022 Apr 19;12(5):1029. doi: 10.3390/diagnostics12051029. PMID: 35626185; PMCID: PMC9139975.

Pauwels R, Brasil DM, Yamasaki MC, Jacobs R, Bosmans H, Freitas DQ, Haiter-Neto F. Artificial intelligence for detection of periapical lesions on intraoral radiographs: Comparison between convolutional neural networks and human observers. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol*. 2021 May;131(5):610-616. doi: 10.1016/j.oooo.2021.01.018. Epub 2021 Jan 22. PMID: 33653645.

Prabhu VD, Saidath K, Suvarna N, Mohtesham I, Shenoy S, Prabhu RV. Artificial intelligence and dentistry: The future. *J Pharm Bioall Sci* 2024;16:S4257-61

Putra RH, Doi C, Yoda N, Astuti ER, Sasaki K. Current applications and development of artificial intelligence for digital dental radiography. *Dentomaxillofac Radiol*. 2022 Jan 1;51(1):20210197. doi: 10.1259/dmfr.20210197. Epub 2021 Jul 8. PMID: 34233515; PMCID: PMC8693331.

Radha RC, Raghavendra BS, Subhash BV, Rajan J, Narasimhadhan AV. Machine learning techniques for periodontitis and dental caries detection: A narrative review. *Int J Med Inform*. 2023 Oct;178:105170. doi: 10.1016/j.ijmedinf.2023.105170. Epub 2023 Jul 31. PMID: 37595373.

Real AD, Real OD, Sardina S, Oyonarte R. Use of automated artificial intelligence to predict the need for orthodontic extractions. *Korean J Orthod*. 2022 Mar 25;52(2):102-111. doi: 10.4041/kjod.2022.52.2.102. PMID: 35321949; PMCID: PMC8964473.

Romandini P, Marruganti C, Romandini WG, Sanz M, Grandini S, Romandini M. Are periodontitis and dental caries associated? A systematic review with meta-analyses.

J Clin Periodontol. 2024 Feb;51(2):145-157. doi: 10.1111/jcpe.13910. Epub 2023 Dec 12. PMID: 38084804.

Rösing CK, Randall C, Giacaman RA. Editorial: Dental caries and periodontal diseases as non-communicable chronic diseases. Front Oral Health. 2023 Jan 6;3:1113029. doi: 10.3389/froh.2022.1113029. PMID: 36686600; PMCID: PMC9852967.

Sabharwal A, Stellrecht E, Scannapieco FA. Associations between dental caries and systemic diseases: a scoping review. BMC Oral Health. 2021 Sep 25;21(1):472. doi: 10.1186/s12903-021-01803-w. PMID: 34563194; PMCID: PMC8466895.

Schulzer M. Diagnostic tests: a statistical review. Muscle Nerve. 1994 Jul;17(7):815-9. doi: 10.1002/mus.880170719. PMID: 8008012.

Schwendicke F, Singh T, Lee JH, Gaudin R, Chaurasia A, Wiegand T, Uribe S, Krois J; IADR e-oral health network and the ITU WHO focus group AI for Health. Artificial intelligence in dental research: Checklist for authors, reviewers, readers. J Dent. 2021 Apr;107:103610. doi: 10.1016/j.jdent.2021.103610. Epub 2021 Feb 22. PMID: 33631303.

Shan T, Tay FR, Gu L. Application of Artificial Intelligence in Dentistry. J Dent Res. 2021 Mar;100(3):232-244. doi: 10.1177/0022034520969115. Epub 2020 Oct 29. PMID: 33118431.

Tahmasbi S, Shokoofi H, Dalaie K, Behnaz M, Aghdashi F, Bastami F, Ebadifar A, Mirmohammadsadeghi H, Biglar N, Kavousinejad S. Deep Learning-Based Prediction of Orthognathic Surgery Need in Skeletal Class II Patients Using Facial Profile Images: An Artificial Intelligence Study. J Imaging Inform Med. 2025 Aug 13. doi: 10.1007/s10278-025-01625-0. Epub ahead of print. PMID: 40804594.

Talpur S, Azim F, Rashid M, Syed SA, Talpur BA, Khan SJ. Uses of Different Machine Learning Algorithms for Diagnosis of Dental Caries. J Healthc Eng. 2022 Mar 31;2022:5032435. doi: 10.1155/2022/5032435. PMID: 35399834; PMCID: PMC8989613.

Tonetti MS, Greenwell H, Kornman KS. Staging and grading of periodontitis: Framework and proposal of a new classification and case definition. J Periodontol. 2018 Jun;89 Suppl 1:S159-S172. doi: 10.1002/JPER.18-0006. Erratum in: J Periodontol. 2018 Dec;89(12):1475. PMID: 29926952.

Uzun Saylan BC, Baydar O, Yeşilova E, Kurt Bayrakdar S, Bilgir E, Bayrakdar IŞ, Çelik Ö, Orhan K. Assessing the Effectiveness of Artificial Intelligence Models for Detecting Alveolar Bone Loss in Periodontal Disease: A Panoramic Radiograph Study. Diagnostics (Basel). 2023 May 19;13(10):1800. doi: 10.3390/diagnostics13101800. PMID: 37238284; PMCID: PMC10217015.

Vodanović M, Subašić M, Milošević D, Savić Pavičin I. Artificial Intelligence in Medicine and Dentistry. Acta Stomatol Croat. 2023 Mar;57(1):70-84. doi: 10.15644/asc57/1/8. PMID: 37288152; PMCID: PMC10243707.

World Health Organization. Global oral health status report: towards universal health coverage for oral health by 2030. Geneva: WHO; 2022. Available from: <https://www.who.int/team/noncommunicable-diseases/global-status-report-on-oral-health-2022>

Yasin ET, Erturk M, Tassoker M, Koklu M. Automatic mandibular third molar and mandibular canal relationship determination based on deep learning models for preoperative risk reduction. Clin Oral Investig. 2025 Mar 25;29(4):203. doi: 10.1007/s00784-025-06285-6. PMID: 40128451; PMCID: PMC11933192.

Yavuz MB, Sali N, Kurt Bayrakdar S, Ekşi C, İmamoğlu BS, Bayrakdar İŞ, Çelik Ö, Orhan K. Classification of Periapical and Bitewing Radiographs as Periodontally Healthy or Diseased by Deep Learning Algorithms. Cureus. 2024 May 18;16(5):e60550. doi: 10.7759/cureus.60550. PMID: 38887333; PMCID: PMC11181894.