

**Univerzita Karlova**  
**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Biologie



**Lucie Ungermanová**

Využití moderních zobrazovacích metod při hodnocení morfologie zubů  
The use of modern imaging methods in the assessment of tooth morphology

Bakalářská práce

Školitelka: RNDr. Šárka Bejdová, Ph.D.

Praha, 2024

## **Poděkování**

Velice ráda bych poděkovala své školitelce RNDr. Šárce Bejdové, Ph.D. za cenné poskytnuté rady, vstřícnost a ochotu během sepisování mé bakalářské práce.

## **Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 2. 8. 2024

Lucie Ungermanová

## Abstrakt

Analýzy zubní morfologie a jejích variací hodnocených na úrovni jedinců či celých populací představují důležitou součást mnoha výzkumů. Hodnocení dentální morfologie lze provádět širokým výběrem metod, kdy každá z nich s sebou přináší odlišné možnosti, výhody, ale též určité limity. Starší tradiční metody hodnocení dentální morfologie přinesly spoustu cenných informací pojednávajících o morfologii zubů a jejích variacích, nicméně jsou též svazovány některými limity, jako je například určitá míra subjektivity vyskytující se při tradičním hodnocení diskretních dentálních znaků, jež vytváří riziko nejednotných pozorování a výsledků analýz, či omezené množství informací získaných o tvaru zubů pomocí tradičních morfometrických měření. Překonání těchto limitů bylo možné prosazením nových hodnotících přístupů využívajících možností pokročilých zobrazovacích technologií, které dokážou zachytit detailní zubní morfologii. Na tomto základě umožňují nové hodnotící přístupy provádět analýzy tvarů zubů a jejich komponent, dále také tlouštěk zubních tkání či detailní zkoumání morfologie okluzní korunkové plochy. Pomocí výstupů těchto morfologických analýz lze zkoumat například genový tok mezi populacemi, dále pohlavní dimorfismus v rámci jednotlivých populací, lze též přispět k molekulárním analýzám dentálního vývoje, nebo je možné interpretovat životní styl zkoumaných jedinců. Nicméně i tyto nové hodnotící přístupy mají své nevýhody. Využívané pokročilé zobrazovací technologie s sebou přinášejí vysoké technické nároky, a pojí se s nimi také často vysoká cena těchto přístrojů, která může snižovat jejich dostupnost. Vysoké technické nároky jsou též kladeny na sběr, zpracování a uchování dat, k čemuž jsou vyžadovány pokročilé počítačové programy a velkokapacitní datová úložiště. Práce s daty je navíc značně časově náročná, což může ve svém důsledku negativně ovlivnit velikost zkoumaného souboru zubů. Na rozsáhlost studií má též negativní vliv obtížné srovnávání získaných dat, jelikož neexistují volně přístupné databáze 3D zubních skenů, a navíc se často vyskytují metodické odlišnosti v rámci jednotlivých studií, které znemožňují jejich rozsáhlejší porovnání. I přes tyto nevýhody však došlo k rozsáhlému prosazení nových metod hodnotících dentální morfologii, které přinesly nejen nové analytické možnosti, ale též mnoho nových poznatků o dentální morfologii a její variabilitě.

**Klíčová slova:** dentální morfologie, 3D skenery, výpočetní tomografie, geometrická morfometrie, morfometrické mapování, dentální topografická analýza

## **Abstract**

Analyses of dental morphology and its variations evaluated at the level of individuals or entire populations are an important part of many studies. Dental morphology assessment can be performed by a wide range of methods, each of which brings different possibilities, advantages, but also certain limitations. Earlier traditional methods of assessing dental morphology have provided a wealth of valuable information about tooth morphology and its variations, but they also have some limitations, such as the degree of subjectivity involved in traditional assessment of discrete dental features, which creates the risk of inconsistent observations and analysis results, or the limited amount of information obtained about tooth shape using traditional morphometric measurements. Overcoming these limitations has been possible by implementation of new assessment approaches that exploit the potential of advanced imaging technologies and can capture detailed dental morphology. On this basis, the new assessment approaches allow analyses of tooth shapes and components, as well as dental tissue thicknesses and detailed examination of the occlusal crown surface morphology. The output of these morphological analyses can be used to investigate, for example, gene flow between populations, sexual dimorphism within a populations, can contribute to molecular analyses of dental development, or can interpret the lifestyle of the individuals studied. However, even these new evaluation approaches have their drawbacks. Advanced imaging technologies used bring in high technical demands and they are also often associated with high prices, which can reduce the availability of these devices. High technical demands are also placed on data collection, processing and storage, which require advanced computer programmes and high-capacity data storage. In addition, data handling is very time-consuming, which can have a negative impact on the size of the set of teeth. The extensiveness of studies is also negatively affected by the difficulty of comparing the data obtained, as there are no freely accessible databases of 3D dental scans, plus methodological differences often occur within individual studies, which prevents large-scale comparisons. Despite these disadvantages, however, there has been widespread adoption of new methods for assessing dental morphology, which have not only provided new analytical capabilities but also many new insights into dental morphology and its variability.

**Key words:** dental morphology, 3D scanners, computed tomography, geometric morphometrics, morphometric mapping, dental topographic analysis

## Obsah

1	Úvod.....	1
2	Tradiční metody hodnocení morfologie zubů.....	2
2.1	ASU DAS .....	2
2.2	Tradiční morfometrie .....	2
3	Moderní metody hodnocení morfologie zubů .....	4
3.1	Akvizice dat .....	4
3.1.1	Výpočetní tomografie .....	5
3.1.2	3D skenery .....	5
3.2	Vyhodnocení dat .....	6
3.2.1	Geometricko-morfometrické metody .....	7
3.2.1.1	Geometricko-morfometrické analýzy s landmarkovými a semi- landmarkovými daty.....	7
3.2.1.2	Morfometrické mapování dentice .....	10
3.2.1.2.1	Morfometrické mapování kořene.....	14
3.2.1.2.2	Morfometrické mapování korunky .....	14
3.2.2	Dentální topografická analýza .....	15
4	Závěr .....	19
5	Seznam použité literatury .....	21

## Seznam zkratek

ASU DAS	Arizona State University Dental Anthropology System
bu	Bukální
br	Bukální rýha
car	Carabelliho hrbolek
CBCT	Cone beam computed tomography; výpočetní tomografie s kuželovým svazkem
co	<i>Crista obliqa</i>
CT	Computed tomography; výpočetní tomografie
di	Distální
DSH	Dentino-sklovinná hranice
DNE	Dirichlet normal energy
GIS	Geographic information system; geografický informační systém
<i>Homo sp.</i>	<i>Homo species</i>
hyp	<i>Hypoconus</i>
la	Labiální
li	Linguální
lr	Linguální rýha
me	Mesiální
met	<i>Metaconus</i>
OPC	Orientation patch count
OPCR	Orientation patch count rotated
par	<i>Paraconus</i>
PCV	Portion de ciel visible; efekt zastínění okolím
pro	<i>Protoconus</i>
r	Poloměr
re	Reliéf
RFI	Relief index; index reliéfu
v	Výška
2D	Two-dimensional; dvojrozměrný
3D	Three-dimensional; trojrozměrný
μCT	Micro-computed tomography; výpočetní mikrotomografie

# 1 Úvod

Lidská dentice vykazuje v základu vysokou míru podobnosti mezi jedinci, protože je její vývoj podmíněn striktní genetickou regulací (Stojanowski et al. 2017; Thesleff 2000). I přes přísnou genetickou kontrolu jsou pozorovány určité odlišnosti v dentální morfologii např. v počtu zubů, ve stavbě korunky a kořenů či v jejich velikosti. Tyto odlišnosti jsou přisuzovány provázanosti geneticky podmíněných vývojových procesů s environmentálními vlivy podílejících se společně na odontogenezi každého jedince, což bylo prokázáno ve studiích na jednovaječných dvojčatech (Scott et al. 1984; Townsend et al. 2005). Za účelem hodnocení této variability bylo potřeba vyvinout metody schopné analyzovat dentální morfologii a její variace.

Prvotní analýzy byly orientovány na vizuální hodnocení diskretních dentálních znaků. Pro sjednocení těchto pozorování mezi badateli po celém světě byl vyvinut ASU DAS systém (z angl. Arizona State University Dental Anthropology System), který má své široké využití v analýzách dentální morfologie (Maaranen et al. 2021; Scott et al. 2008; Turner et al. 1991). Pro hodnocení metrických parametrů zubů nezachytitelných vizuálním hodnocením se prosadily metody tradiční morfometrie, které hodnotí nejčastěji mesio-distální, buko-linguální a okluzo-gingivální rozměr zubů (Adams et al. 2004). Tento přístup má však omezené schopnosti, jelikož je množství přesně definovaných rozměrů měřených na zubech omezené. Kromě těchto starších tradičních metod hodnocení dentální morfologie se v posledních desetiletích začaly prosazovat nové přístupy, které využívají možností zobrazovacích technologií umožňujících neinvazivním způsobem zachycení detailní vnější dentální morfologie, v případě některých technologií i morfologie interních dentálních struktur (Guy et al. 2013; Kusnoto et al. 2002; Panetta 2014). Mezi tyto přístupy lze zařadit např. geometricko-morfometrické analýzy využívající landmarková a semi-landmarková data, které jsou nejčastěji využívány k hodnocení morfologie zubní korunky (Kieser et al. 2007), dále metodu morfometrického mapování uplatňující se též při hodnocení korunkové morfologie, ale i kořenové morfologie (Bondioli et al. 2010; Morita et al. 2016), či topografickou analýzu využívanou k detailním hodnocením okluzní korunkové plochy (Berthaume et al. 2018).

Cílem této práce je představit tyto nové přístupy hodnotící dentální morfologii, poukázat na jejich možnosti, výhody a nevýhody přinášející v analýzách a porovnat potenciál jejich využití se staršími tradičními metodami, které zahrnují hodnocení diskretních dentálních znaků pomocí ASU DAS systému a metody tradiční morfometrie.

## **2 Tradiční metody hodnocení morfologie zubů**

Morfologii zubů a její možné variace lze hodnotit pomocí nejrůznějších metod, mezi něž se řadí i tradiční metody zahrnující hodnocení diskrétních dentálních znaků, které jsou nejčastěji hodnoceny pomocí systému ASU DAS (z angl. Arizona State University Dental Anthropology System), či tradiční morfometrií (Bailey et al. 2009; Scott et al. 2017; Wood et al. 1983). Ačkoli jsou tradiční metody široce využívány ve studiích dentální morfologie, mají své limity. Nelze pomocí nich zachytit veškeré morfologické aspekty, které lze na zubu hodnotit, či mohou podléhat subjektivitě v hodnocení morfologických variací vedoucí k nejednotným pozorováním (Al-Shahrani et al. 2014; Nichol et al. 1986). Za účelem překročení těchto limitů byly vytvořeny moderní metody podávající více informací o dentální morfologii, čehož bylo dosaženo díky rozvoji zobrazovacích technologií schopných zachytit detailní zubní morfologii (Bernal 2007; Gaboutchian et al. 2021).

### **2.1 ASU DAS**

ASU DAS (z angl. Arizona State University Dental Anthropology System) je tradiční kvalitativní metoda hodnocení diskrétních morfologických znaků lidské dentice, která je dodnes standardně využívanou metodou hodnocení nemetrických dentálních znaků a jejich vývojových variant u populací moderního člověka, pomocí níž byly sjednoceny morfologické údaje dentálních znaků pro jejich pozorování a hodnocení (Turner et al. 1991; Scott et al. 2008; Scott et al. 2017). I přes jednotný systém plaket znázorňujících možné variace v jednotlivých morfologických znacích je u této metody riziko subjektivního hodnocení vývojových stádií znaků napříč pozorovateli, které může vést k nejednotným pozorováním a výsledkům analýz (Nichol et al. 1986). Vyvarování se této problematice napomohl rozvoj zobrazovacích metod poskytujících detailní zachycení zubní morfologie, kterou lze dohromady s využitím statistických analýz hodnotit bez možného rizika subjektivity (Gaboutchian et al. 2021).

### **2.2 Tradiční morfometrie**

Hodnocení dentální morfologie lze provádět též za pomoci tradiční morfometrie (Wood et al. 1987). Tradiční morfometrie je soubor statistických analýz, pomocí níž lze hodnotit velikost zubů a možnou variabilitu ve velikosti mezi zkoumanými zuby měřením mesio-distálního, buko-linguálního a okluzo-gingiválního rozměru (Adams et al. 2004). Výhodami tradiční morfometrie jsou snadná měření lineárních rozměrů, které lze zachytit např. kalipery (McKeown et al. 2013). Další výhodou tohoto přístupu je možnost analýzy



velkého souboru zubů, jelikož není akvizice dat natolik časově náročná (Yong et al. 2018). V neposlední řadě existuje navíc již mnoho sepsaných publikací a databází využívajících tyto rozměry, tudíž je možné srovnávat mezi sebou velké kolekce dat (Pietrusewsky 2018). Nicméně lineární rozměry zubů měřené pomocí tradiční morfometrie podávají informace primárně o velikosti zubů, nejsou však schopné pojednávat o přesném tvaru zubů či jeho variacích (Adams et al. 2004; Al-Shahrani et al. 2014; Rohlf 1999). Za účelem studia velikostí i tvarů zubů jsou využívány geometricko-morfometrické analýzy, které jsou schopné analyzovat s přesností i tvar zubů a jeho variace, o to efektivněji díky vyobrazení detailní zubní morfologie pomocí moderních zobrazovacích metod (Al-Shahrani et al. 2014; Gaboutchian et al. 2021).

### **3 Moderní metody hodnocení morfologie zubů**

S rozvojem neinvazivních zobrazovacích metod, jako jsou skenery či výpočetní tomografie, který započal v druhé polovině 20. století, došlo mimo jiné k inovaci v přístupech hodnotících dentální morfologii (Gaboutchian et al. 2021; Plotino et al. 2006; Schulz et al. 2021). Za vznikem moderních metod hodnocení morfologie zubů, jako jsou například geometricko-morfometrické metody využívající landmarková a semi-landmarková data (Kieser et al. 2007), morfometrické mapování (Bondioli et al. 2010; Morita et al. 2016) či topografická analýza dentice (Cuesta-Torralvo et al. 2021) stojí právě zobrazovací technologie, pomocí nichž lze detailně v trojrozměrném zobrazení zachytit nejen externí zubní morfologii, ale pomocí výpočetní tomografie též nedestruktivním přístupem interní zubní komponenty, jako je například stavba kořenových kanálků či povrch dentino-sklovinné hranice tvořící bariéru mezi zubovinou a sklovinou, které jsou následně pomocí nejrůznějších metod hodnocení dentální morfologie analyzovány a interpretovány (Amano et al. 2006; Gaboutchian et al. 2021; Guy et al. 2013; Chiang et al. 2007; Somma et al. 2009). Spojením moderních analytických metod a trojrozměrného vyobrazení zubu lze získat na rozdíl od tradičních přístupů hodnocení zubní morfologie, jako je např. ASU DAS či tradiční morfometrie, více informací popisujících komplexní dentální morfologii, a je možné snáz interpretovat dříve obtížně interpretované aspekty, jako je například morfologie vnitřních struktur či dentální opotřebení (Bernal 2007; Dumbryte et al. 2021; Smith 1984). Díky své informativnosti a přesnosti se moderní zobrazovací a analytické metody recentně zařadily mezi nejhojněji využívané přístupy hodnocení dentální morfologie (Guy et al. 2013).

#### **3.1 Akvizice dat**

Pro analýzy dentální morfologie je potřeba nejlépe nedestruktivním způsobem zachytit dentální morfologii v podobě fotografií či skenů pomocí různých 2D a 3D zobrazovacích metod (Braga 2015; Giese-Kraft et al. 2022). Zatímco 2D zobrazovací metody vytvářejí planární obraz snímaného objektu, 3D zobrazovací metody vizualizují objekt v trojrozměrném vyobrazení (Shahbazian et al. 2012).

V současnosti tvoří primárně 3D zobrazovací metody neopominutelný prvek při morfologických dentálních analýzách, jelikož umožňují neinvazivním způsobem trojrozměrně vyobrazit komplexní zubní struktury (Erten et al. 2018; Guy et al. 2013). Tento pokrok ve zobrazování dentálních vzorků umožňuje oproti 2D metodám, jako jsou například

planární fotografie či klasický rentgen, znázornit komplexněji a detailněji zubní morfologii, díky čemuž lze provádět více měření a vytvořit kompletnější morfologický profil, než tomu bylo možné za využití pouze dvojrozměrných metod (Smith et al. 2009; Wolf et al. 2023). Mezi nejčastěji využívané 3D skenovací technologie vyobrazující dentální morfologii patří optické skenery a výpočetní tomografie (angl. computed tomography, CT), konkrétně  $\mu$ CT a CBCT (cone beam computed tomography), jež jsou modifikacemi klasického CT (Dowker et al. 1997; Jung et al. 2015).

### **3.1.1 Výpočetní tomografie**

Výpočetní tomografie, zkr. CT (z angl. computed tomography) je pokročilá nedestruktivní zobrazovací metoda rekonstruující trojrozměrnou morfologii skenovaného objektu v podobě série jednotlivých řezů dohromady tvořících 3D repliku objektu (Mazonakis et al. 2016). Skenování je prováděno emitací rentgenového záření skrze objekt, jež je po průchodu objektem vychytáváno detektorem, který zaznamenává různou míru dopadajícího záření procházejícího skrze jednotlivé struktury a tkáně o různé hustotě, což umožňuje kontrastně vyobrazit i jeho vnitřní komponenty. Tato data jsou následně počítačově převedena do digitálních obrazů jednotlivých řezů daného objektu, které jsou poté poskládány do kompletního 3D modelu (Mazonakis et al. 2016; Panetta 2014). Pro účely skenování dentice jsou využívány modifikované verze klasického CT – CBCT (z angl. cone beam computed tomography) a  $\mu$ CT, které umožňují detailnější rozlišení tvrdých zubních tkání a struktur v porovnání s klasickým CT (Dong et al. 2014; Suomalainen et al. 2015; Tachibana et al. 1990).  $\mu$ CT navíc díky svému vysokému rozlišení poskytuje oproti CBCT detailnější vyobrazení dentální morfologie, a je tak vhodné pro skenování jednotlivých zubů a malých zubních komponent (Marca et al. 2013).

Nespornou výhodou využití výpočetní tomografie při vyobrazení dentální morfologie je možnost nedestruktivním způsobem zobrazit trojrozměrně interní zubní komponenty, jako jsou například zubní kanálky (Peters et al. 2000).

### **3.1.2 3D skenery**

3D skenery představují další z technologií využívaných při zobrazování dentální morfologie. Pro trojrozměrné skenování dentice jsou nejčastěji uplatňovány bezkontaktní optické skenery využívající při skenování proud klasického světla, či laserové skenery aplikující laserový paprsek (González De Villaumbrosia et al. 2016). V průběhu skenování se v případech obou typů skenerů odráží paprsek ať už klasického světla či laseru od

povrchu zkoumaného zubu a je detekován senzorem. Podle velikosti úhlů odraženého paprsku a polohy senzoru a zdroje záření lze softwarově vypočítat 3D souřadnice bodů, které jsou pomocí skeneru na povrchu zubu zachycovány. Tyto body jsou následně propojeny v kompletní 3D model skenovaného zubu (Bernardini et al. 2002).

Nevýhodou 3D skenerů je schopnost vyobrazit pouze vnější povrch zubů, neumožňují zachytit vnitřní dentální struktury, jako je tomu možné u výpočetní tomografie (Mendricky et al. 2020). Oproti CT zařízením jsou optické skenery obecně cenově levnější a dostupnější variantou, nicméně je potřeba brát v potaz schopnost zachycení interní morfologie, kterou optické skenery nemají, a také rozlišení a kvalitu jednotlivých skenů (Douglass 2022; Kritikos et al. 2022; Mendricky et al. 2020).

Výběr vhodné 3D zobrazovací metody je ovlivňován několika aspekty. Prvním aspektem je, které části zubu je třeba zobrazit. 3D skenery umožňují zobrazení pouze vnější dentální morfologie, zatímco CBCT a  $\mu$ CT umožňují zobrazení i interních zubních komponent (Kusnoto et al. 2002; Mendricky et al. 2020). Dalším z aspektů je rozlišení a úroveň zachycení detailů, s čímž se také pojí cenová relace daných zařízení. Jelikož je  $\mu$ CT vysokorozlišovací technologií umožňující nejdetaillnější zachycení jak vnější, tak vnitřní dentální morfologie, jeho pořizovací cena je vyšší než u CBCT či 3D skenerů (Douglass 2022; Tomaszewska et al. 2018). Všechny tyto aspekty rozhodují o výběru 3D zobrazovací metody pro dané skenování.

### **3.2 Vyhodnocení dat**

Trojdimenzionální dentální skeny pořízené 3D zobrazovacími technologiemi, mezi něž se řadí výpočetní tomografie či 3D skenery, je možné následně analyzovat pomocí nejrůznějších analytických metod, jako jsou geometricko-morfometrické metody zahrnující tradiční geometricko-morfometrické analýzy využívající landmarková data či bezlandmarkové morfometrické mapování, a nebo lze dentální morfologii analyzovat pomocí topografické analýzy (Cuesta-Torralvo et al. 2021; Morita et al. 2016; Yong et al. 2018).

### **3.2.1 Geometricko-morfometrické metody**

Pomocí geometricko-morfometrických metod lze kvantitativně hodnotit velikost a tvar zkoumaných zubů a jejich variace především mezi populacemi (Al-Shahrani et al. 2014). K tomuto hodnocení lze přistupovat buď za využití souboru landmarkových a semi-landmarkových dat (Kieser et al. 2007) či přístupem využívajícím 3D povrchové sítě nazývaným morfometrické mapování (Bondioli et al. 2010; Morita et al. 2016).

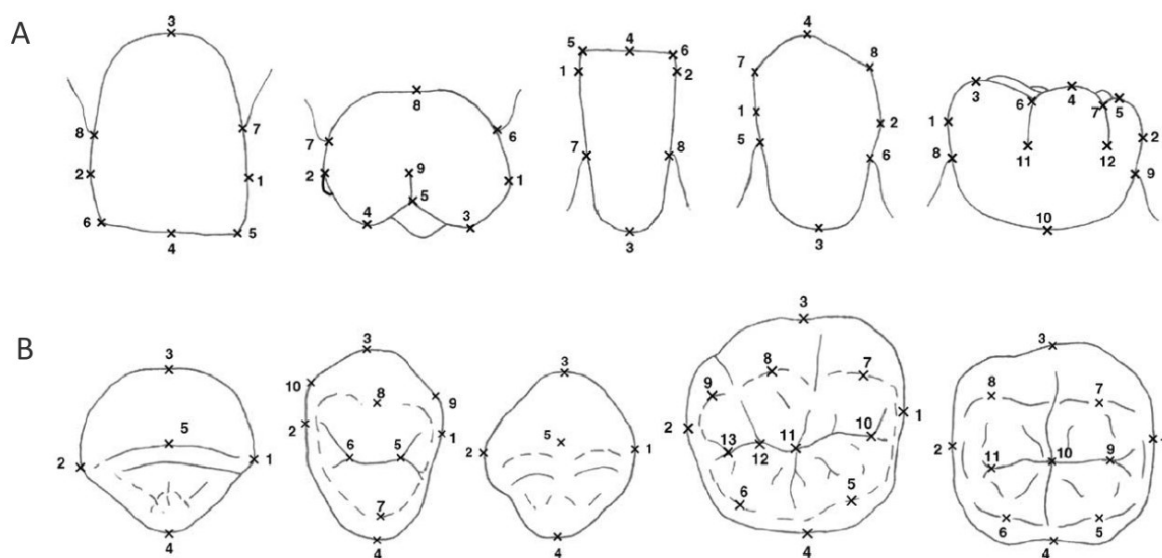
#### **3.2.1.1 Geometricko-morfometrické analýzy s landmarkovými a semi-landmarkovými daty**

Geometricko-morfometrické analýzy využívající landmarková a semi-landmarková data lze popsat jako komplex statistických metod hodnotících velikost a tvar zubů a jejich možnou variabilitu mezi populacemi za využití souboru landmarkových a semi-landmarkových bodů, které se řadí již mezi tradičně využívané analýzy v rámci geometrické morfometrie (např. analýza hlavních komponent, kanonická variační analýza, metoda ohebných pásků) (Gamarra et al. 2022; Gómez-Robles et al. 2015; Kieser et al. 2007; Mitteroecker et al. 2009). Využití těchto metod nabízí širší pole působnosti v porovnání s tradiční morfometrií, jelikož hodnocení variací tvaru a velikosti zubů za využití landmarkových a semi-landmarkových dat podává komplexnější popis a umožňuje jejich přesnější analýzu než za využití klasické morfometrie, která informuje primárně o velikosti zubů, avšak o tvaru a jeho variacích pouze minimálně (Adams et al. 2004; Bernal 2007; Huanca Ghislanzoni et al. 2013; Yong et al. 2018).

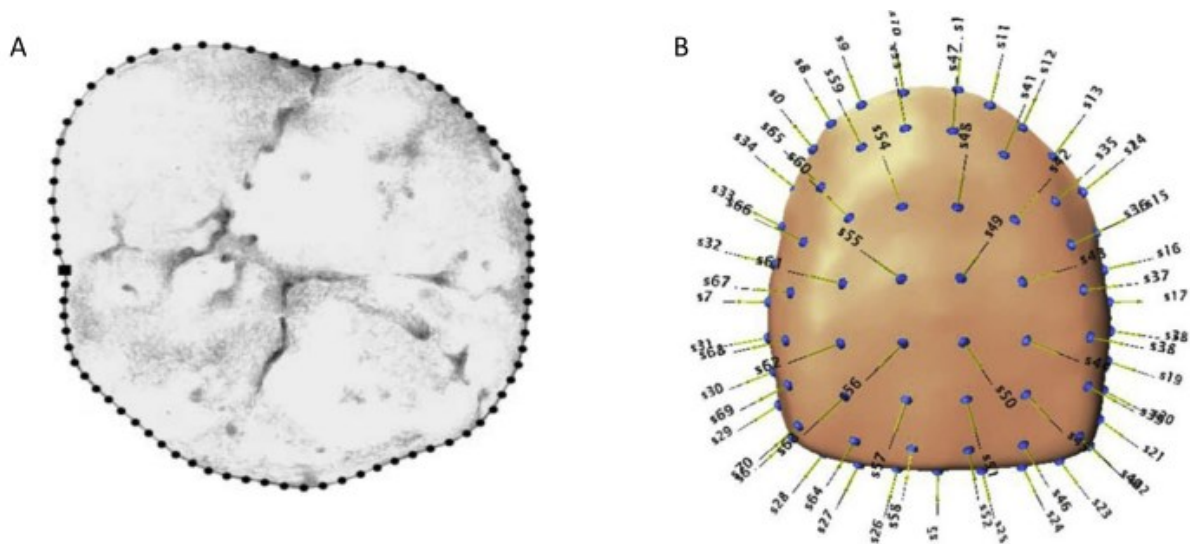
Geometricko-morfometrické metody pracují s již zmíněnými landmarkovými a semi-landmarkovými daty. Landmarky jsou jednoznačně definované body nacházející se na klíčově vypovídajících místech zkoumaného zubu (Obrázek 1), zatímco semi-landmarky jsou pomocné body osazující obrys či křivky zkoumaného objektu (Obrázek 2), čímž doplňují landmarková data o přesnější morfologický popis tvaru daného zubu, jelikož limitující počet landmarků nemusí být vždy k tomuto popisu sám o sobě dostatečný (Adams et al. 2004; Bernal 2007; Gunz et al. 2013; Robinson et al. 2001). Landmarky a semi-landmarky mohou být umístovány na dvojrozměrné dentální projekce (Bernal 2007) či na trojrozměrné skeny pořízené různými typy 3D zobrazovacích technologií, mezi něž se řadí CBCT a mikro-CT (Park et al. 2019; Simon et al. 2015) či 3D skenery (Huanca Ghislanzoni et al. 2013). 3D landmarková data udávají více informací než data dvojrozměrná, jako je například zachycení prostorových souřadnic, které s 2D daty nelze zachytit (Yanagida et al.

2021). Naopak výhodou dvojrozměrných geometricko-morfometrických analýz je oproti trojrozměrným geometricko-morfometrickým analýzám snazší akvizice dat. Ta vykazuje oproti 3D analýzám menší časovou náročnost, což umožňuje zahrnout do studií větší soubor zkoumaných zubů, a provádět tak komplexnější studie (Gómez-Robles et al. 2011).

Přístup využívající landmarková a semi-landmarková data má určité nevýhody. Jednou z nich je umísťování bodů na zubní povrchy se silnějším opotřebením, tím pádem s méně zřetelnou korunkovou morfologií, které je velmi komplikované a není vždy možné tyto vzorky zahrnout do analýzy (Benazzi et al. 2012; Dykes et al. 2019; Ungar 2004). Druhou z nich je potřeba homologického souboru zubů, jelikož na nehomologický soubor zubů nelze aplikovat dostatečné množství homologických landmarků potřebných pro jejich porovnání v dalších analýzách (Perez et al. 2006). Nicméně i přes tyto nevýhody jsou analýzy využívající landmarková a semi-landmarková data účinným nástrojem pro analýzu morfologické variability mezi zkoumanými zuby (Bookstein 1997; Yong et al. 2018).



Obrázek 1 – Dentální landmarky na příkladu vybraných typů zubů. (A) Bukální pohled, zleva doprava vyobrazený pravý horní střední řezák, první horní první stolička, levý spodní centrální řezák, levý spodní špičák, levá spodní první stolička. (B) Okluzní pohled, zleva doprava zobrazený pravý horní centrální řezák, pravý horní první třenový zub, levý spodní špičák, levá spodní první stolička, levá spodní druhá stolička. Popis jednotlivých landmarků dostupný u Robinson et al. (2002). (Převzato dle Robinson et al. 2002).



Obrázek 2 – Semi-landmarky vyznačené na vybraných zubech. (A) Umístění obrysových semi-landmarků (tečky) a jednoho landmarku (čtverec) na dvojrozměrné zobrazení okluzní plochy horní první stoličky. (Převzato a upraveno dle Perez et al. 2006). (B) Vyznačené obrysové a povrchové semi-landmarky na trojrozměrném zobrazení horního centrálního řezáku z laterálního pohledu. (Převzato a upraveno dle Wang et al. 2019).

Výzkumy dentálních tvarových variací prováděné pomocí geometricko-morfometrických analýz využívajících landmarková a semi-landmarková data našly mimo jiné uplatnění ve studiích migrací lidských populací (Gamarra et al. 2022). Mnohé informace o migracích lidských populací získané na základě odlišnosti či podobnosti dentální morfologie mezi porovnávanými populacemi přinesly již výzkumy využívající tradiční hodnocení diskretních znaků pozorovaných na okluzní korunkové ploše (např. Hanihara 2008; Irish 2015). Avšak geometricko-morfometrické analýzy s landmarkovými a semi-landmarkovými daty využívající pokročilé zobrazovací technologie schopné zachytit i interní dentální struktury přinesly do těchto výzkumů nové možnosti. Jednou z takovýchto možností je analýza morfologie dentino-sklovinné hranice (zkr. DSH) (Gamarra et al. 2022). Dentino-sklovinná hranice je interní dentální struktura tvořící rozhraní mezi zubovinou mesenchymálního původu a sklovinou ektodermálního původu, která svým tvarem blízce odráží vnější morfologii okluzní korunkové plochy (Chiang et al. 2007; Thesleff 2003; Skinner et al. 2008). Toho je využíváno při výskytu poškození vnějšího sklovinného reliéfu, kdy může DSH sloužit v analýzách jako jeho vhodná náhrada, jelikož je k poškození zubním obrusem méně náchylná (Gamarra et al. 2022; Jernvall et al. 2000; Skinner et al. 2008). Analýza DSH tak přináší výhodu v porovnání s tradičním hodnocením diskretních znaků na okluzní ploše, u kterých může obrus negativně ovlivnit jejich hodnocení (Gamarra et al.

2022). Geometricko-morfometrické analýzy jsou navíc citlivější k zachycení variací i mezi geograficky blízkými populacemi, které nemusí být zaznamenány pomocí diskretních dentálních znaků (Gamarra et al. 2022).

Výhod geometricko-morfometrických analýz bylo využito např. ve studii Gamarra et al. (2022) porovnávající variabilitu v morfologii DSH stálých horních prvních stoliček u ostatků populací moderního člověka datovaných v rozmezí od mladší doby kamenné po dobu bronzovou nalezených na severu Pyrenejského poloostrova. Porovnávány byly dentální ostatky z geograficky odlišných nalezišť, přičemž se jedno z nich nachází ve vnitrozemí (Cueva de El Mirador, Španělsko, stáří ostatků datované mezi zhruba 4390 – 4880 lety (Vergès et al. 2016)) a tři zbylé v pobřežní oblasti (Cova de Can Sadurní, Španělsko, stáří ostatků datované mezi zhruba 3155 – 2400 lety (Edo et al. 1982); Cova de la Guineu, Španělsko, stáří ostatků datované mezi zhruba 3353 – 2454 lety (Gamarra et al. 2022); Cova de les Agulles, Španělsko, stáří ostatků datované mezi zhruba 3340 – 3000 lety (Gómez et al. 2008)). Výsledky studie poukázaly na výraznou tvarovou podobnost DSH mezi ostatky populací ze středozezemního pohřebiště Cueva de El Mirador a dvou pobřežních pohřebišť Cova de la Guineu a Cova de les Agulles. Vzhledem k tomu, že je morfologický vývoj DSH pod genetickou kontrolou (Monson et al. 2020), naznačují výsledky studie pravděpodobně na probíhající genový tok mezi těmito geograficky odlišenými populacemi. Vznik genového toku mezi populacemi poukazuje na jejich potkávání a míšení v důsledku migrací. U dentálních ostatků populace z pobřežního naleziště Cova de Can Sadurní byla však pozorována odlišná morfologie DSH na rozdíl od ostatků z ostatních zmíněných nalezišť, čímž je naznačována vzdálenější příbuznost této populace s okolními populacemi, a také její možná genetická izolovanost (Gamarra et al. 2022).

Geometricko-morfometrické zubní analýzy využívající landmarková a semi-landmarková data lze též aplikovat například na intra-populační analýzy pohlavního dimorfismu (Miyazaki et al. 2024; Oliva et al. 2021). Pohlavní dimorfismus určuje některé rozdílné morfologické vlastnosti mezi odlišnými pohlavími, mezi něž se též řadí odlišnosti ve velikosti a tvaru zubů (Natarajan et al. 2024; Schwartz et al. 2005). Tyto mezipohlavní odlišnosti v dentální morfologii jsou připisovány kombinaci na pohlaví vázaných genetických faktorů s faktory epigenetickými (Natarajan et al. 2024).

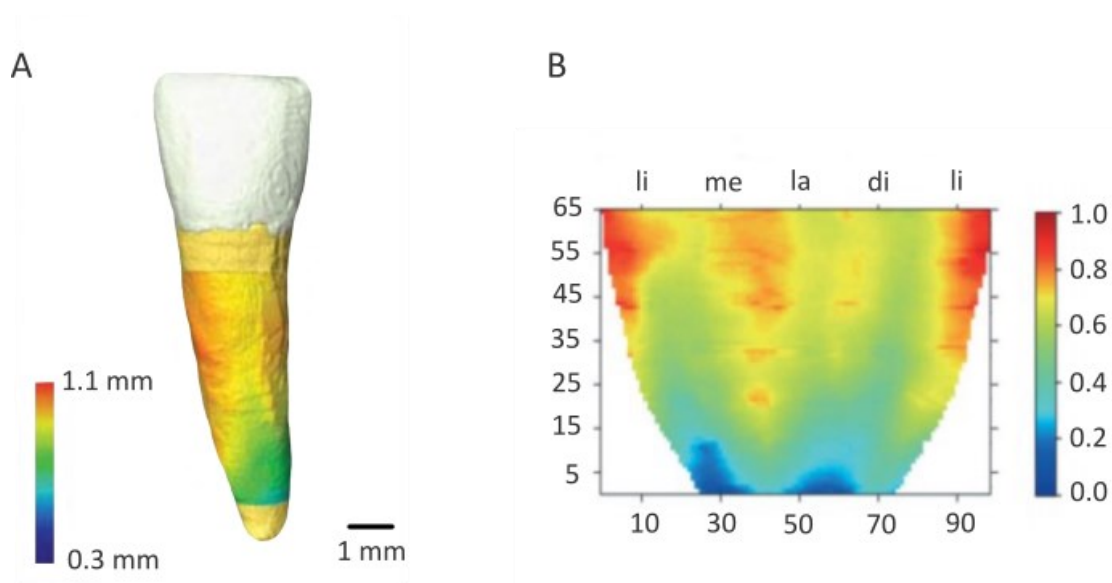
### **3.2.1.2 Morfometrické mapování dentice**

Mezi geometricko-morfometrické metody analyzující variace ve velikosti a tvaru zubů lze též řadit metodu zvanou morfometrické mapování (Bondioli et al. 2010;



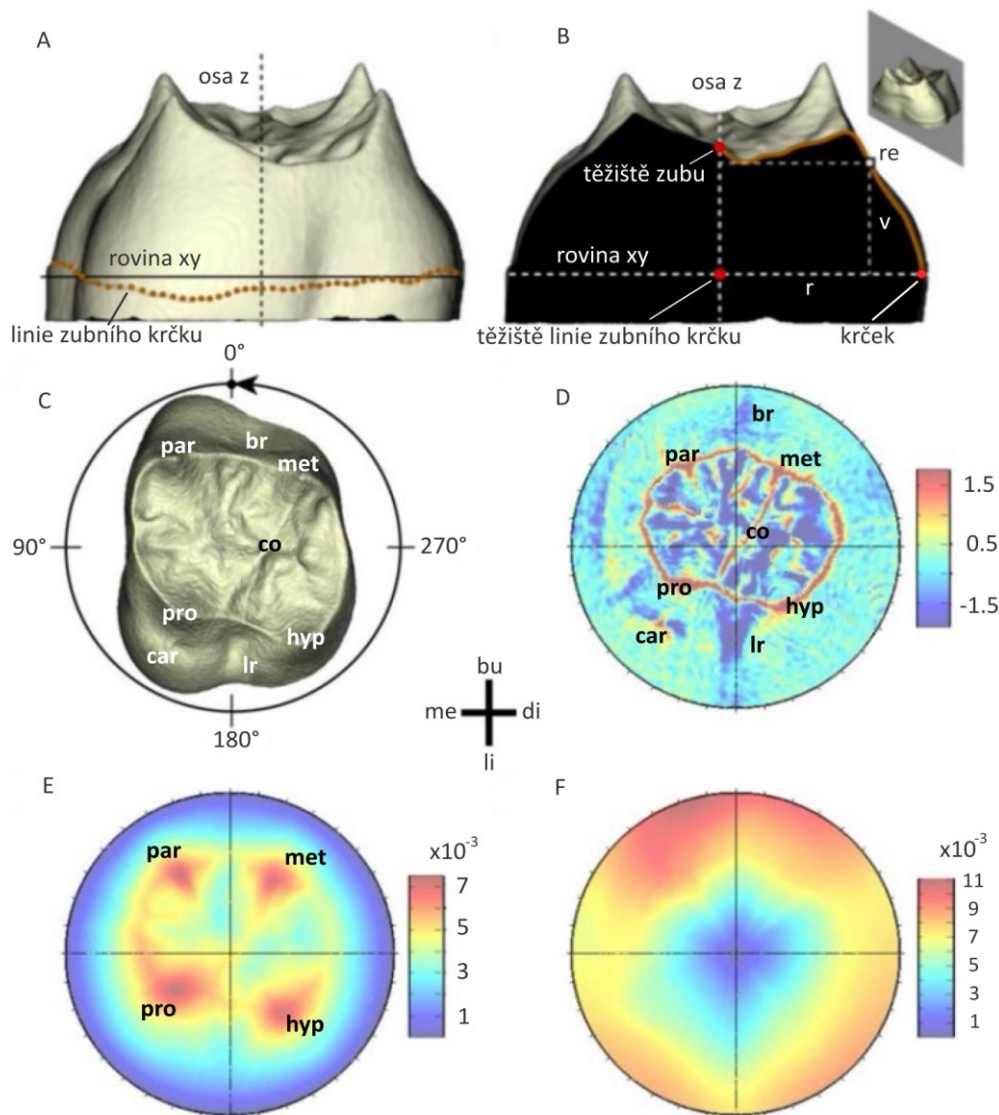
Zollikofer et al. 2001). Na rozdíl od geometrické morfometrie pracující s landmarkovými daty využívá morfometrické mapování 3D povrchové sítě umožňující zachycení tvarových a rozměrových variací a jejich následnou analýzu bez potřeby homologie mezi zkoumanými zuby (Bondioli et al. 2010; Morita et al. 2016). Pomocí 3D zobrazovacích metod je zachycována detailní morfologie skenovaných zubů, která je projektována do dvojrozměrných rovinných map, čímž jsou přehledně vizualizovány morfologické rysy zubů, a je tak možné kvantifikovat jejich podrobná morfometrická data (Morita et al. 2016; Zollikofer et al. 2001). Jelikož je metoda prováděna bez nutnosti landmarkových dat, a tím pádem bez nutnosti homologie porovnávaných zubů, lze oproti geometricko-morfometrickým metodám využívajícím landmarková data efektivněji analyzovat soubor zubů, který může vykazovat variabilitu v morfologii a nemusí se kompletně homologicky shodovat (Morita et al. 2016).

Morfometrické mapování umožňuje podrobně mapovat jak kořen zuby, na kterém se pomocí této metody sleduje tloušťka kořenové zuboviny (Bondioli et al. 2010), tak zubní korunku, u které je mapován trojrozměrný povrch dentino-sklovinné hranice (zkr. DSH) (Morita et al. 2016; Morita et al. 2020b). Povrch DSH je v případě mapování korunky skenován z důvodu nenarušení jeho morfologie u možného výskytu opotřebení svrchního sklovinného reliéfu (Morita et al. 2016). Jak již bylo řečeno výše, jelikož DSH svým tvarem blízce odráží vnější morfologii okluzní plochy zuby, slouží tak jako adekvátní náhrada vnějšího zubního reliéfu při výskytu dentálního opotřebení (Jernvall et al. 2000; Morita et al. 2014; Skinner et al. 2008). V úvodu analýzy jsou zuby skenovány pomocí výpočetní mikrotomografie (angl. zkr.  $\mu$ CT), která umožňuje nedestruktivním způsobem zobrazit komplexní vnější i vnitřní zubní morfologii (Kim et al. 2007), čehož se při skenování kořene využívá k vizualizaci jednotlivých zubních tkání a detailního zachycení tloušťky kořenové zuboviny v průběhu kořene (Bondioli et al. 2010). Při skenování korunky  $\mu$ CT nabízí možnost detailního nedestruktivního zobrazení dentino-sklovinné hranice (Morita et al. 2016; Morita et al. 2020a). Takto vzniklé trojrozměrné skeny jsou v případě kořene i korunky převedeny na planární mapy, jež vykreslují vybrané morfometrické vlastnosti, kterými jsou v případě kořene tloušťka kořenové zuboviny a v případě korunky metriky poloměr, reliéf a výška dentino-sklovinné hranice promítnuté na mapě pomocí škály barev identifikovatelné dle přiložené barevné osy (Bondioli et al. 2010; Morita et al. 2016). Odlišně barevné části v případě planární mapy kořenové zuboviny představují různorodou tloušťku kořenové zuboviny v průběhu kořene (Obrázek 3) (Bondioli et al. 2010).



Obrázek 3 – Morfometrické mapování kořene. (A) Trojrozměrné vyobrazení dočasného řezáku (z labiálního pohledu), na jehož kořeni je pomocí barevné škály znázorněna různorodá tloušťka zuboviny v jeho průběhu (v mm). (B) Morfometrická mapa vybraného úseku kořene z části A prezentující dvojrozměrná data popisující tloušťku kořenové zuboviny. Mapa se skládá z 65 řádků (osa y) a 100 sloupců (osa x). Osy barevné škály u části A i B popisují vzrůstající tloušťku zuboviny od modré barvy směrem k červené. Pohledy: li – linguální; me – mesiální; la – labiální; di – distální. (Převzato a upraveno dle Bondioli et al. 2010).

V případě planárních map DSH jsou barevně odlišeny různé hodnoty vybraných metrik na ní zkoumaných (Obrázek 4) (Morita et al. 2016). Těmito metrikami jsou reliéf popisující míru zakřivení povrchu (Obrázek 4D); dále výška představující vertikální rozměry DSH, které vykreslují přibližnou polohu a rozložení hrbolků, a měří se jako vzdálenost mezi externím povrchem DSH a rovinou xy, jež prochází těžištěm linie zubního krčku a je optimalizovaná podle krčkové linie (Obrázek 4E); a poloměr podávající informace o tvaru a velikosti zubu, který je měřený jako velikost horizontálních rozměrů DSH směrem od těžiště zubu ležícího na linii zubního krčku vně k obrysu DSH (z okluzní perspektivy) (Obrázek 4F) (Morita et al. 2016; Morita et al. 2020a; Morita et al. 2020b). Morfometrické mapování slouží k přehledné vizualizaci a interpretaci morfometrických vlastností a metrik zkoumaných na zubech a jejich možných variacích, kterým lze na základě získaných kvantitativních dat přisuzovat možné důvody jejich vzniku (Bondioli et al. 2010; Morita et al. 2016).



Obrázek 4 – Morfometrické mapování korunky. (A) 3D vyobrazení dentino-sklovinné hranice (zkr. DSH) první levé horní stoličky (z distálního pohledu) s vyobrazenou linií zubního krčku. (B) Řez 3D modelem DSH (z distálního pohledu) se znázorněnou osou z procházející těžištěm zubu, rovinou xy procházející těžištěm linie zubního krčku a měřenými metrikami: r – poloměr; re – reliéf; v – výška. (C) 3D model DSH (z okluzního pohledu). Orientace modelu (směry): 0° – bukální (bu), 90° – mesiální (me), 180° – linguální (li) a 270° – distální (di). par – *paraconus*; met – *metaconus*; pro – *protoconus*; hyp – *hypoconus*; car – Carabelliho hrbolek; br – bukální rýha; lr – linguální rýha; co – *crista obliqua*. (D) Mapa reliéfu vyobrazující míru zakřivení povrchu DSH. (E) Výšková mapa vertikálních rozměrů DSH představující přibližnou polohu a rozložení jednotlivých hrbolků. (F) Mapa poloměru prezentující horizontální rozměry DSH referující o jejím tvaru a velikosti. (Převzato a upraveno dle Morita et al. 2016).

### 3.2.1.2.1 Morfometrické mapování kořene

Zde bude blíže znázorněno využití morfometrického mapování kořene, pomocí kterého je v průběhu kořene sledována různorodá tloušťka kořenové zuboviny (Bondioli et al. 2010; Macchiarelli et al. 2013). Hlavní studie porovnávající tloušťku kořenové zuboviny u dočasných jednokořenových zubů jedinců moderního člověka a rodu *Homo neanderthalensis* poukázaly v závislosti na hodnotách vyobrazených v morfometrických mapách na podobné rozložení tloušťky zuboviny v průběhu kořene u obou studovaných jedinců (Bondioli et al. 2010; Macchiarelli et al. 2013). Přes podobné rozložení tloušťky zuboviny u obou jedinců byla sledována vyšší regionální variabilita tloušťky zuboviny v blízkosti cemento-sklovinné hranice u neandrtálce než u moderního člověka (Bondioli et al. 2010; Macchiarelli et al. 2013). Variabilita v distribuci kořenové zuboviny mezi moderním člověkem a neandrtálcem je s největší pravděpodobností připisována možným odlišnostem v genetických procesech podílejících se na vývoji zubů či funkčnímu přizpůsobení na mechanickou zátěž vyvíjenou na dentici (Bayle et al. 2012; Kupczik et al. 2010; Macchiarelli et al. 2013).

### 3.2.1.2.2 Morfometrické mapování korunky

Jak bylo výše popsáno, v případě korunky je pomocí morfometrického mapování mapován trojrozměrný povrch dentino-sklovinné hranice, která blízce odráží tvar okluzní plochy (Morita et al. 2016; Morita et al. 2020b; Skinner et al. 2008). Toho je primárně využíváno při analýze dentální metamerické variability (Morita et al. 2016). Dentální metamerická variabilita představuje odlišnosti v morfologii série zubů stejného typu, metamerů, náležícím jednomu jedinci, což u člověka představují v nejhojnějším počtu stoličky (Morita et al. 2016). Rozdílnosti ve tvaru a velikosti korunky či uspořádání okluzního reliéfu jsou porovnávány mezi se sebou sousedícími první, druhou, popřípadě třetí stoličkou (Hlusko 2002; Morita et al. 2016). Analýza rozdílností v rámci metamerické variability má za cíl studovat vznik odlišných stoličkových variací díky různorodé dynamice aktivačních a inhibičních molekulárních drah podílejících se na vývoji každého z metamerů (Kavanagh et al. 2007; Morita et al. 2016). Nepřímý vliv na morfologickou variabilitu metamerů mohou mít i ekologické faktory spojené s typem přijímané stravy, které reflektují funkční morfologii zubů jedince. Selektce na určitý funkční morfologický vzor daný dietními faktory poté ovlivňuje proces dentálního vývoje, který má již přímý vliv na vznik metamerických variací (Kavanagh et al. 2007).

Například ve studii Morita et al. (2016) byla pomocí morfometrického mapování studována variace v morfologii mezi první, druhou a třetí stálou horní stoličkou moderního člověka. Srovnání souborů tří zkoumaných metrik, kterými jsou reliéf, výška a poloměr dentino-sklovinné hranice v rámci všech metamerů poukázalo na fakt, že morfologie dentino-sklovinné hranice druhé a třetí stoličky má tendenci se tvarově přibližovat k morfologii dentino-sklovinné hranice první stoličky s jejich vzrůstající velikostí. Tato skutečnost, a zároveň odlišnosti v morfologii jednotlivých po sobě jdoucích stoliček v řadě jsou přisuzovány vlivu vývoje první stoličky posilující dynamiku molekulárních inhibičních drah na vývoj druhé i třetí stoličky, což poukazuje na vývoj metamerů jako celku, nikoli na individuální vývoj každého ze zubů (Braga et al. 2007; Kavanagh et al. 2007). Morfologické analýzy metamerické dentální variability tedy přispěly ke studiím molekulární biologie o dynamice inhibičních drah zapojujících se při vývoji zubních metamerů (Morita et al. 2016).

### **3.2.2 Dentální topografická analýza**

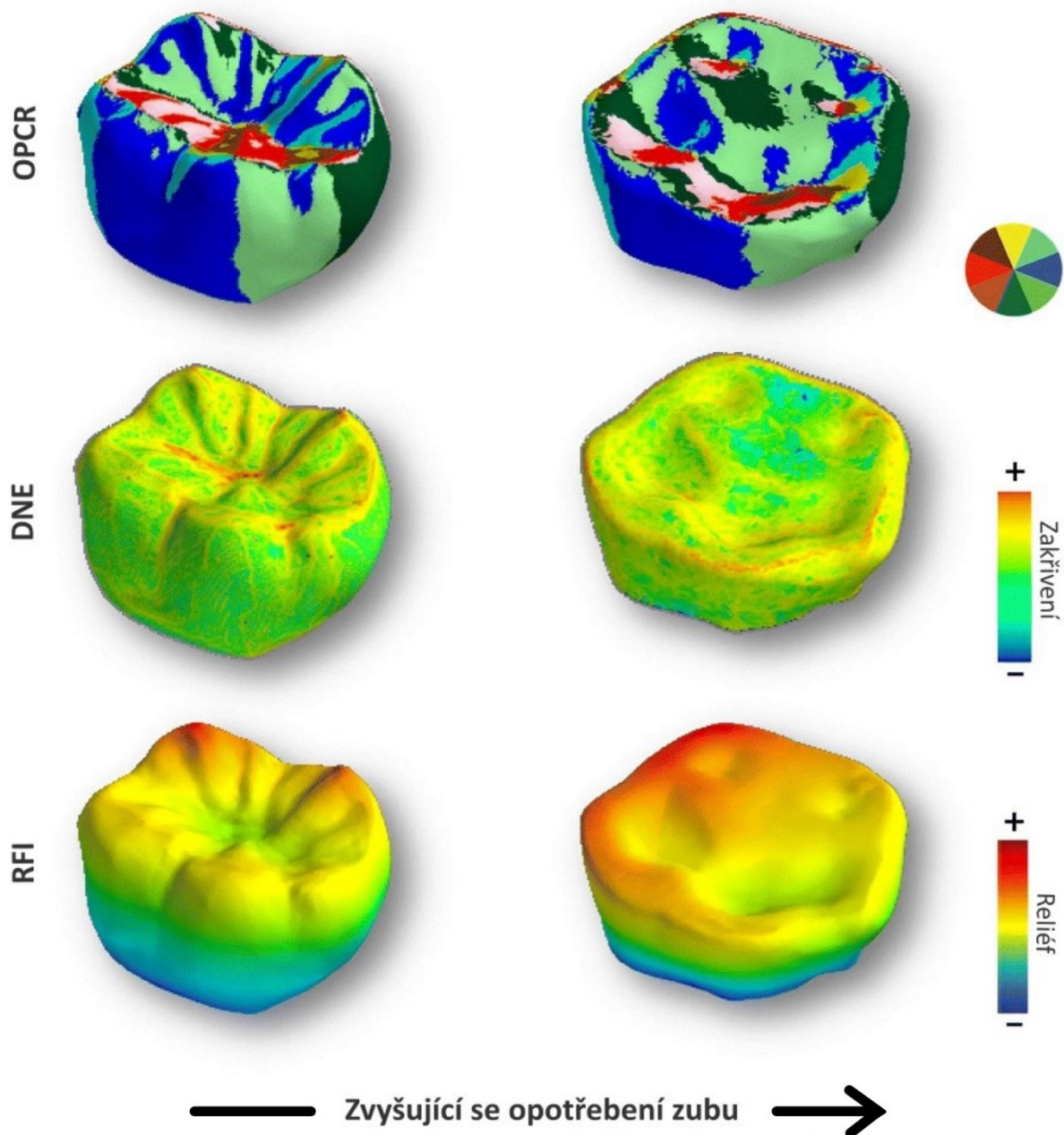
Dentální topografie představuje další moderní přístup hodnotící morfologii zubů, která se uplatňuje při charakteristice trojrozměrných povrchových vlastností okluzní korunkové plochy odrážející funkci dentální morfologie (Klukkert et al. 2012). Tato metoda umožňuje efektivně zkoumat i zuby postižené dentálním obrusem, jelikož nevyužívá landmarková data (Klukkert et al. 2012; Ulhaas et al. 2007). Landmarková data vyžadují umístění na přesně definovaná místa, jež pro ně variabilita dentálního obrusu neposkytuje (Klukkert et al. 2012; Pampush et al. 2018). Navíc topografická analýza využívá specifické topografické metriky lišící se od metrik morfometrických v typu poskytované informace o dentální morfologii. Topografické metriky popisují povrchovou okluzní morfologii a její změny, zatímco morfometrické metriky zachycující primárně tvarové a rozměrové aspekty zubu bez bližšího zkoumání detailní okluzní morfologie (Avià et al. 2022; Morita et al. 2016; Pampush et al. 2016). Pomocí hodnot topografických metrik a jejich variací lze interpretovat funkční dentální morfologii jedince a jeho životní styl zahrnující např. informace o obývané oblasti a potřebnému uzpůsobení lokálním potravním podmínkám (Berthaume et al. 2018; Molnar et al. 1972; Morita et al. 2020b; Pampush et al. 2018; Ungar 2006; Varrela 2006).

V počátcích byla analýza prováděna přístupem GIS (z angl. geographic information system). Pomocí GIS je možné studovat geografický povrch a srovnávat jeho vrstvy, a analogickým přirovnáním povrchu zubu k přírodní krajině lze zub pomocí tohoto přístupu

zkoumat obdobně, jelikož podává informace o zubním reliéfu, jako je například sklon zubních plošek či opotřebení hrotů a incizních hran (Ungar et al. 1999; Zuccotti et al. 1998). Analýzy za využití GIS v některých krocích redukuje 3D data na data dvojrozměrná pro lepší interpretaci výsledků, nicméně tím ztrácejí možnost popisu detailní dentální komplexity (Evans et al. 2007; Guy et al. 2013; Yu et al. 2012). Proto byly v průběhu vývoje topografické analýzy popsány metriky nespécifické pro GIS, mezi které se řadí například DNE (z angl. Dirichlet normal energy) značící míru povrchového zakřivení a ostrosti okluzních hran a hrbolků (Bunn et al. 2011). Mezi využívané metriky dále náleží RFI (index reliéfu, z angl. relief index) určující relativní výšku korunky zubu vyjádřením poměru trojrozměrného povrchu korunky ku její dvojrozměrné planární projekci (Boyer 2008). Dalšími dvěma často aplikovanými metrikami nespécifickými pro GIS jsou OPC (z angl. orientation patch count) a OPCR (z angl. orientation patch count rotated, inovovaná verze OPC) rozděluje okluzní plochu do malých trojúhelníkových plošek, a podle směřování normálových vektorů každé z nich jsou na základě stejnosměrné orientace propojovány do větších celků, pomocí jejichž následné barevné vizualizace referují o komplexitě okluzní plochy (Evans et al. 2007; Winchester 2016). Recentně popsanou topografickou metrikou je PCV (efekt zastínění okolím, z franc. portion de ciel visible) popisující exponovanost zubního povrchu k osvětlení dopadajícího na okluzní plochu, analogicky udávající pravděpodobnost opotřebení těchto částí. Nejvíce exponovanými místy okluzní dentální plochy jsou hrbolky či hřebeny, jejichž vysoká hodnota PCV značí nízkou míru resistance proti opotřebení (Berthaume et al. 2018; Berthaume et al. 2019). Tyto a další topografické metriky nespécifické pro GIS, kterými lze dohromady oproti GIS komplexněji hodnotit zubní morfologii a její změny v plně trojrozměrném zobrazení, se s rozvojem 3D skenovacích metod staly nejpoužívanějším přístupem v rámci topografické analýzy dentice (Berthaume et al. 2019; Guy et al. 2013; M'kirera et al. 2003). Hodnoty jednotlivých topografických metrik jsou zobrazovány v podobě přechodů barevných škál či barevně odlišených ploch na základě typu informace, kterou o dentálním povrchu podávají (Obrázek 5).

Následnými statistickými analýzami vybraných topografických metrik hodnocených na okluzní ploše daných zubů lze interpretovat charakteristické dentální morfologické vlastnosti odrážející specifický životní styl populací druhů zahrnující např. typ jejich přijímané stravy (Berthaume et al. 2018). Například ve studii zabývající se morfologií dolních druhých stoliček druhu *Homo naledi* byly pozorovány vysoké hodnoty RFI značící výraznou členitost okluzního reliéfu (Berthaume et al. 2018). Zároveň ve studii

zahrnující druhy *Homo habilis*, *Homo erectus* a *Homo rudolfensis* byly pozorovány u dolních druhých stoliček u všech zmíněných druhů vysoké hodnoty DNE poukazující na výraznou ostrost zubních hrotů (Ungar 2004). Vysoké hodnoty jak RFI tak DNE naznačují přizpůsobení morfologie okluzní plochy na zpracování tuhé a vláknité stravy jako je nezpracované maso, které mohlo tvořit primární zdroj potravy těchto druhů (Berthaume et al. 2018; Ungar 2004). Nižší hodnoty DNE u dolních druhých stoliček nálezů *Homo* sp. (STW 80, Sterkfontein, Jihoafrická republika, stáří fosilie datované mezi 1,7 až 1,4 miliony lety (Davies et al. 2020; Kuman et al. 2000); SK 15, Swartkrans, Jihoafrická republika, stáří fosilie datované přibližně 1,4 milionů let (Balter et al. 2008; Zanolli et al. 2022); a fosilie spodní čelisti, Cave of Hearts, Jihoafrická republika, stáří fosilie datované mezi 670 – 560 tisíci lety (Berthaume et al. 2018; Herries 2011)) naopak poukazují na méně ostré hroty na okluzní ploše, tím pádem na morfologické přizpůsobení potravě méně náročné na její rozmělnění žvýkáním, což může naznačovat zavedení zpracovávání potravy pomocí nástrojů či vaření (Berthaume et al. 2018; Zink et al. 2014). Dále nízká hodnota u další z metrik, PCV, objevená u druhu *Homo naledi* poukazuje na vyšší míru resistance proti dentálnímu opotřebení, tedy na adaptaci proti abrazivnímu nedietnímu materiálu, jako jsou částičky písku či malé kamínky, který jsou neúmyslně konzumovány s potravou (Berthaume et al. 2018; Berthaume et al. 2019). Výskyt abrazivního nedietního materiálu může ukazovat na změnu stravy obsahující více tohoto materiálu, jako například nemyté podzemní rostlinné hlízky, či přechod do prostředí s větším výskytem abrazivního materiálu, které zapříčinilo výskyt abrazivních částiček při konzumaci jakékoli stravy (Berthaume et al. 2018).



Obrázek 5 – Topografická analýza zubních korunek. Trojrozměrné vyobrazení korunky spodní první levé stoličky dvou jedinců moderního člověka s odlišnou mírou zubního opotřebení (v levém sloupci znázorněn subjekt s nízkým opotřebením, v pravém sloupci subjekt s vysokým opotřebením) hodnocené pomocí tří vybraných topografických metrik (v prvním řádku hodnocena korunková komplexita pomocí OPCR (z angl. orientation patch count rotated), v řádku druhém hodnoceno povrchové zakřivení pomocí DNE (z angl. Dirichlet normal energy) a ve třetím řádku hodnocen korunkový reliéf pomocí RFI (index reliéfu, z angl. relief index)). Barevné kolo v pravé horní části obrázku vysvětlující hodnocení dentální komplexity pomocí OPCR označuje orientaci barevných ploch pro okluzní perspektivu. (Převzato a upraveno dle Cuesta-Torralvo et al. 2021).



## 4 Závěr

Analýzy dentální morfologie hrají důležitou roli v pochopení molekulárních procesů podílejících se na vývoji zubů, ale také v otázkách životního stylu zahrnujícího např. stravovací návyky či obývané prostředí, jelikož se všechny tyto aspekty odráží na výsledné morfologii zubů (Berthaume et al. 2018; Morita et al. 2016).

Starší tradiční analytické přístupy přinesly cenné informace pojednávající o zubní morfologii a jejich možných variacích hodnocením diskrétních dentálních znaků, které jsou nejčastěji hodnoceny pomocí systému ASU DAS, či měřením mesio-distálního, buko-linguálního a okluzo-gingiválního rozměru zubů pomocí tradiční morfometrie (Adams et al. 2004; Scott et al. 2008). Výhodami těchto tradičních metod je nenáročnost hodnocení znaků či měření již zmíněných lineárních rozměrů, které nevyžadují složitá technologická zařízení (McKeown et al. 2013; Turner et al. 1991). Sběr dat a jejich hodnocení také nebývá tolik časově náročné, tudíž lze zahrnout do jednotlivých studií poměrně velký soubor zubů (Yong et al. 2018). Navíc existuje již mnoho publikací pojednávajících o hodnocení diskrétních dentálních znaků či využívajících lineární zubní rozměry, tudíž lze výstupy analýz porovnávat s již velkým množstvím dostupných dat (Hanihara 2008; Pietrusewsky 2018). Ačkoli mají tradiční přístupy své výhody a široké uplatnění ve studiích dentální morfologie, nelze s jejich pomocí analyzovat komplexní dentální morfologii, mezi kterou spadají interní dentální struktury či detailní povrchové morfologické charakteristiky zubů (Al-Shahrani et al. 2014). Revoluci v tomto ohledu přineslo prosazení nových přístupů hodnotících dentální morfologii využívajících možností pokročilých zobrazovacích technik. Pomocí těchto nových přístupů, mezi něž se řadí geometricko-morfometrické metody či topografická analýza, lze hodnotit detailní dentální morfologii vyobrazenou právě pomocí moderních zobrazovacích technologií, mezi něž se řadí 3D skenery či výpočetní tomografie (Cuesta-Torralvo et al. 2021; Dowker et al. 1997; Gamarra et al. 2022; Jung et al. 2015; Morita et al. 2016). Tyto zobrazovací technologie mají schopnost detailně zachytit vnější morfologii zubů, a pomocí výpočetní tomografie navíc i nedestruktivním způsobem vnitřní dentální struktury, např. zubní kanálky či povrch dentino-sklovinné hranice (González De Villaumbrosia et al. 2016; Peters et al. 2000). Díky tomu umožňují moderní hodnotící přístupy analyzovat vícero aspektů dentální morfologie (Guy et al. 2013). Tyto moderní přístupy mají však oproti metodám tradičním i několik nevýhod. Jednou z nich jsou vysoké technické nároky na využívané zobrazovací technologie, které jsou také častokrát velmi cenově nákladné, a nemusí tak být vždy dostupné (Evans et al. 2018; Shah 2014). Vysoké

technické nároky jsou též kladeny na sběr dat, jejich uchování a analýzu, k čemuž jsou potřeba pokročilé počítačové programy a velkokapacitní datová úložiště, které tradiční metody nevyžadují (Evans et al. 2018; Monteiro 2012; Uhlík Spěváčková et al. 2023). Navíc bývá velikost souboru zubů zkoumaného pomocí moderních metod zpravidla menší v porovnání s analýzami využívajícími tradiční metody, a to jak z důvodu značné časové náročnosti zpracovávání dat, tak kvůli obtížnému srovnávání získaných dat, jelikož neexistují volně přístupné databáze 3D zubních skenů, a navíc se často vyskytují metodické odlišnosti v rámci jednotlivých studií, což znemožňuje jejich rozsáhlejší porovnání (Rad et al. 2016; Wolf et al. 2020; Yong et al. 2018).

Ačkoli umožnil rozvoj moderních zobrazovacích technologií a hodnotících přístupů překonat limity tradičních metod a získat nové informace pro studium genetických, evolučních a ekologických vlivů formujících morfologii zubů (Berthaume et al. 2018; Gaboutchian et al. 2021; Morita et al. 2016), v konečném důsledku je vhodné kombinovat dohromady moderní přístupy s přístupy tradičními pro získání komplexních výsledků analýz dentální morfologie (Monson et al. 2020).

## 5 Seznam použité literatury

- Adams, D. C., Rohlf, F. J., & Slice, D. E. 2004. Geometric morphometrics: ten years of progress following the 'revolution'. *Italian Journal of Zoology* 71 (1): 5–16.
- Al-Shahrani, I., Dirks, W., Jepson, N., & Khalaf, K. 2014. 3D-geomorphometrics tooth shape analysis in hypodontia. *Frontiers in Physiology* 5: 154, 1–12. <https://doi.org/10.3389/fphys.2014.00154>.
- Amano, M., Agematsu, H., Abe, S., Usami, A., Matsunaga, S., Suto, K., & Ide, Y. 2006. Three-dimensional analysis of pulp chambers in maxillary second deciduous molars. *Journal of Dentistry* 34 (7): 503–508.
- Avià, Y., Romero, A., Estebaranz-Sánchez, F., Pérez-Pérez, A., Cuesta-Torralvo, E., & Mónica Martínez, L. 2022. Dental topography and dietary specialization in Papionini primates. *Frontiers in Ecology and Evolution* 10: 969007, 1–17.
- Bailey, S. E., Weaver, T. D., & Hublin, J.-J. 2009. Who made the Aurignacian and other early Upper Paleolithic industries? *Journal of Human Evolution* 57 (1): 11–26.
- Balter, V., Blichert-Toft, J., Braga, J., Telouk, P., Thackeray, F., & Albarède, F. 2008. U–Pb dating of fossil enamel from the Swartkrans Pleistocene hominid site, South Africa. *Earth and Planetary Science Letters* 267 (1–2): 236–246.
- Bayle, P., Bondioli, L., Dean, Ch., & Macchiarelli, R. 2012. Unrolled roots: topographic variation of the dentine thickness in Neandertal and modern human anterior teeth. *Proceedings of the European Society for the study of Human Evolution* 1: 36.
- Benazzi, S., Fornai, C., Buti, L., Toussaint, M., Mallegni, F., Ricci, S., Gruppioni, G., Weber, G. W., Condemi, S., & Ronchitelli, A. 2012. Cervical and crown outline analysis of worn Neanderthal and modern human lower second deciduous molars. *American Journal of Physical Anthropology* 149 (4): 537–546.
- Bernal, V. 2007. Size and shape analysis of human molars: comparing traditional and geometric morphometric techniques. *Journal of Comparative Human Biology* 58 (4): 279–296.
- Bernardini, F., & Rushmeier, H. 2002. The 3D model acquisition pipeline. *Computer Graphics Forum* 21 (2): 149–172.
- Berthaume, M. A., Delezene, L. K., & Kupczik, K. 2018. Dental topography and the diet of *Homo naledi*. *Journal of Human Evolution* 118: 14–26.
- Berthaume, M. A., Winchester, J., & Kupczik, K. 2019. Effects of cropping, smoothing, triangle count, and mesh resolution on 6 dental topographic metrics. *PLOS ONE* 14 (5): e0216229, 1–47.
- Bondioli, L., Bayle, P., Dean, Ch., Mazurier, A., Puymerau, L., Ruff, Ch., Stock, J. T., Volpato, V., Zanolli, C., & Macchiarelli, R. 2010. Technical note: morphometric maps of long bone shafts and dental roots for imaging topographic thickness variation. *American Journal of Physical Anthropology* 142 (2): 328–334.
- Bookstein, F. L. 1997. Landmark methods for forms without landmarks: morphometrics of group differences in outline shape. *Medical Image Analysis* 1 (3): 225–243.
- Boyer, D. M. 2008. Relief index of second mandibular molars is a correlate of diet among prosimian primates and other euarchontan mammals. *Journal of Human Evolution* 55 (6): 1118–1137.

- Braga, J., & Heuze, Y. 2007. Quantifying variation in human dental development sequences: an EVO-DEVO perspective. In: Bailey, S., H., & Hublin, J.-J. (eds) *Dental Perspectives on Human Evolution: State of the Art Research in Dental Paleoanthropology*. Springer, Dordrecht, pp 247–261.
- Braga, J. 2015. Non-invasive imaging techniques. In: Irish, J. D., & Scott, G. R. (eds) *A Companion to Dental Anthropology*. Wiley, Chichester, pp 514–527.
- Bunn, J. M., Boyer D. M., Lipman, Y., St. Clair, E. M., Jernvall, J., & Daubechies, I. 2011. Comparing Dirichlet normal surface energy of tooth crowns, a new technique of molar shape quantification for dietary inference, with previous methods in isolation and in combination. *American Journal of Physical Anthropology* 145 (2): 247–261.
- Cuesta-Torralvo, E., Pacheco, D., Martínez, L. M., Romero, A., Umbelino, C., Avià, Y., & Pérez-Pérez, A. 2021. Three-dimensional proxies to dental wear characterization in a known age-at-death skeletal collection. *Journal of Archaeological Method and Theory* 28 (4): 1261–1275.
- Davies, T. W., Delezenne, L. K., Gunz, P., Hublin, J.-J., Berger, L. R., Gidna, A., & Skinner, M. M. 2020. Distinct mandibular premolar crown morphology in *Homo naledi* and its implications for the evolution of *Homo* species in Southern Africa. *Scientific Reports* 10 (1): 13196, 1–13.
- Dong, G., Dong, Q., Liu, Y., Lou, B., Feng, J., Wang, K., Zhou, X., & Wu, H. 2014. High-resolution micro-CT scanning as an innovative tool for evaluating dental hard tissue development. *Journal of Applied Clinical Medical Physics* 15 (4): 335–344.
- Douglass, M. J. J. 2022. Can optical scanning technologies replace CT for 3D printed medical devices in radiation oncology? *Journal of Medical Radiation Sciences* 69 (2): 139–142.
- Dowker, S. E. P., Davis, G. R., & Elliott, J. C. 1997. X-ray microtomography. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology* 83 (4): 510–516.
- Dumbryte, I., Vailionis, A., Skliutas, E., Juodkazis, S., & Malinauskas, M. 2021. Three-dimensional non-destructive visualization of teeth enamel microcracks using X-ray micro-computed tomography. *Scientific Reports* 11 (1): 14810, 1–8.
- Dykes, S. J., & Pilbrow, V. C. 2019. A mathematical landmark-based method for measuring worn molars in hominoid systematics. *PeerJ* 7: e6990, 1–30.
- Edo, M., & Alonso, M. 1982. Can Sadurní, Begues. In: Cahner Garcia, M., Guitart, J., & Tarradell Mateu, M. (eds) *Les excavacions arqueològiques a Catalunya en els darrers anys, Excavacions Arqueològiques a Catalunya*. Generalitat de Catalunya, Barcelona, pp 65–67.
- Evans, A. R., Wilson, G. P., Fortelius, M., & Jernvall, J. 2007. High-level similarity of dentitions in carnivorans and rodents. *Nature* 445 (7123): 78–81.
- Evans, A. R., & Pineda-Munoz, S. 2018. Inferring mammal dietary ecology from dental morphology. In: Croft, D. A., Su, D. F., & Simpson, S. W. (eds) *Methods in Paleoecology*. Springer International Publishing, Cham, pp 37–51.
- Gaboutchian, A. V., Knyaz, V. A., & Korost, D. V. 2021. New approach to dental morphometric research based on 3D imaging techniques. *Journal of Imaging* 7 (9): 184, 1–20.

- Gamarra, B., Lozano, M., Del Bove, A., Subirà, M. E., Edo, M., Castellana, C., Vergès, J. M., Morales, J. I., Cebrià, A., Oms, F. X., Tornero, C., & Gómez-Bach, A. 2022. Identifying biological affinities of Holocene northern Iberian populations through the inner structures of the upper first molars. *Archaeological and Anthropological Sciences* 14 (3): 38, 1–16.
- Giese-Kraft, K., Jung, K., Schlueter, N., Vach, K., & Ganss, C. 2022. Detecting and monitoring dental plaque levels with digital 2D and 3D imaging techniques. *PLOS ONE* 17 (2): e0263722, 1–14.
- Gómez Bach, A., Tornero, C., Borrell Tena, F., Agustí i Farjas, B., Saña Seguí, M., & Molist i Montaña, M. 2008. Un ejemplo de cavidad sepulcral del neolítico final en la costa nordeste peninsular: la Cueva de las Agulles. In Hernández Pérez, M. S., Soler Díaz, J. A., & López Padilla, J. A. (eds) *IV Congreso del Neolítico Peninsular*, Vol. II, Alicante, pp 92–98.
- Gómez-Robles, A., Bermúdez De Castro, J. M., Martínón-Torres, M., Prado-Simón, L., & Arsuaga, J. L. 2015. A geometric morphometric analysis of hominin lower molars: evolutionary implications and overview of postcanine dental variation. *Journal of Human Evolution* 82: 34–50.
- Gómez-Robles, A., Martínón-Torres, M., Bermúdez De Castro, J. M., Prado-Simón, L., & Arsuaga, J. L. 2011. A geometric morphometric analysis of hominin upper premolars. Shape variation and morphological integration. *Journal of Human Evolution* 61 (6): 688–702.
- González De Villaumbrosia, P., Martínez-Rus, F., García-Orejas, A., Salido, M. P., & Pradies, G. 2016. In vitro comparison of the accuracy (trueness and precision) of six extraoral dental scanners with different scanning technologies. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 116 (4): 543–550.
- Gunz, P., & Mitteroecker, P. 2013. Semilandmarks: a method for quantifying curves and surfaces. *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy* 24 (1): 103–109.
- Guy, F., Gouvard, F., Boistel, R., Euriat, A., & Lazzari, V. 2013. Prospective in (primate) dental analysis through tooth 3D topographical quantification. *PLOS ONE* 8 (6): e66142, 1–17.
- Hanihara, T. 2008. Morphological variation of major human populations based on nonmetric dental traits. *American Journal of Physical Anthropology* 136 (2): 169–182.
- \*Herries, A. I. R. 2011. A chronological perspective on the Acheulian and its transition to the Middle Stone Age in Southern Africa: the question of the Fauresmith. *International Journal of Evolutionary Biology* 2011: 1–25.
- Hlusko, L. J. 2002. Identifying metameric variation in extant hominoid and fossil hominid mandibular molars. *American Journal of Physical Anthropology* 118 (1): 86–97.
- Huanca Ghislanzoni, L. T., Lineberger, M., Cevidanes, L. H., Mapelli, A., Sforza, Ch., & McNamara, J. A. 2013. Evaluation of tip and torque on virtual study models: a validation study. *Progress in Orthodontics* 14 (1): 19, 1–6.
- Chiang, Y.-Ch., Lee, B.S., Wang, Y.-L., Cheng, Y.-A., Chen, Y.-L., Shiau, J.-S., Wang, D.-M., & Lin, Ch.-P. 2007. Microstructural changes of enamel, dentin–enamel junction, and dentin induced by irradiating outer enamel surfaces with CO2 laser. *Lasers in Medical Science* 23 (1): 41–48.

- Irish, J. D. 2015. Assessing dental nonmetric variation among populations. In: Irish, J. D. & Scott, G. R. (eds) *A Companion to Dental Anthropology*. Wiley, Chichester, pp 265–286.
- Jernvall, J., & Jung, H.-S. 2000. Genotype, phenotype, and developmental biology of molar tooth characters. *American Journal of Physical Anthropology* 113 (S31): 171–190.
- Jung, W., Park, S., & Shin, H. 2015. Combining volumetric dental CT and optical scan data for teeth modeling. *Computer-Aided Design* 67–68: 24–37.
- Kavanagh, K. D., Evans, A. R., & Jernvall, J. 2007. Predicting evolutionary patterns of mammalian teeth from development. *Nature* 449 (7161): 427–432.
- Kieser, J. A., Bernal, V., Neil Waddell, J., & Raju, S. 2007. The uniqueness of the human anterior dentition: a geometric morphometric analysis. *Journal of Forensic Sciences* 52 (3): 671–677.
- Kim, I., Paik, K.-S., & Lee, S.-P. 2007. Quantitative evaluation of the accuracy of micro-computed tomography in tooth measurement. *Clinical Anatomy* 20 (1): 27–34.
- Klukkert, Z. S., Dennis, J. C., M’Kirera, F., & Ungar, P. S. 2012. Dental topographic analysis of the molar teeth of primates. In: Bell, L. S. (ed) *Forensic Microscopy for Skeletal Tissues*. Humana Press, New York, pp 145–152.
- Kritikos, M., Urminsky, J., & Buransky, I. 2022. Comparison of optical scanner and computed tomography scan accuracy. In: Durakbasa, N. M., & Gençyılmaz, M. G. (eds) *Digitizing Production Systems*. Springer International Publishing, Cham, pp 521–530.
- Kuman, K., & Clarke, R. J. 2000. Stratigraphy, artefact industries and hominid associations for Sterkfontein, Member 5. *Journal of Human Evolution* 38 (6): 827–847.
- Kupczik, K., & Hublin, J.-J. 2010. Mandibular molar root morphology in Neanderthals and Late Pleistocene and recent *Homo sapiens*. *Journal of Human Evolution* 59 (5): 525–541.
- Kusnoto, B., & Evans, C. A. 2002. Reliability of a 3D surface laser scanner for orthodontic applications. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* 122 (4): 342–348.
- Maaranen, N., Zakrzewski, S., Kharobi, A., Stantis, Ch., Prell, S., Bietak, M., & Schutkowski, H. 2021. The people of Avaris: intra-regional biodistance analysis using dental non-metric traits. *Bioarchaeology of the Near East* 15: 1–24.
- Macchiarelli, R., Bayle, P., Bondioli, L., Mazurier, A., & Zanolli, C. 2013. From outer to inner structural morphology in dental anthropology: integration of the third dimension in the visualization and quantitative analysis of fossil remains. In: Scott, G. R., & Irish, J. D. (eds) *Anthropological Perspectives on Tooth Morphology*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 250–277.
- Marca, C., Dummer, P. M. H., Bryant, S., Vier-Pelisser, F. V., Só, M. V. R., Fontanella, V., Dutra, V. D., & De Figueiredo, J. A. P. 2013. Three-rooted premolar analyzed by high-resolution and cone beam CT. *Clinical Oral Investigations* 17 (6): 1535–1540.

- Mazonakis, M., & Damilakis, J. 2016. Computed tomography: what and how does it measure? *European Journal of Radiology* 85 (8): 1499–1504.
- McKeown, A. H., & Schmidt, R. W. 2013. Geometric morphometrics. In: DiGangi E. A., & Moore, M. K. (eds) *Research Methods in Human Skeletal Biology*. Academic Press, Boston, pp 325–359.
- Mendricky, R., & Sobotka, J. 2020. Accuracy comparison of the optical 3D scanner and CT scanner. *Manufacturing Technology* 20 (6): 791–801.
- Mitteroecker, P., & Gunz, P. 2009. Advances in geometric morphometrics. *Evolutionary Biology* 36 (2): 235–247.
- Miyazaki, J., Kondo, S., & Negishi, S. 2024. Sexual dimorphism in the three-dimensional detailed crown structure of maxillary first premolars". *Journal of Oral Biosciences* 66 (1): 13–19.
- M'kirera, F., & Ungar, P. S. 2003. Occlusal relief changes with molar wear in *Pan troglodytes troglodytes* and *Gorilla gorilla gorilla*. *American Journal of Primatology* 60 (2): 31–41.
- Molnar, S., Barrett, M. J., Brian, L., Brace, Ch. L., Brose, D. S., Dewey, J. R., Frisch, J. E., Ganguly, P., Gejvall, N.-G., Greene D. L., Poirier F. E., Pourchet, M. J., Rhine, S., Turner, Ch. G., Van Valen, L., Von Koenigswald, G. H. R., Wilkinson, R. G., Wolpoff, M. H., & Wright, G. A. 1972. Tooth wear and culture: a survey of tooth functions among some prehistoric populations [and comments and reply]. *Current Anthropology* 13 (5): 511–526.
- Monson, T. A., Fecker, D., & Scherrer, M. 2020. Neutral evolution of human enamel–dentine junction morphology. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117 (42): 26183–26189.
- Monteiro, L. R. 2012. Morphometrics and the comparative method: studying the evolution of biological shape. *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy* 24 (1): 25–32.
- Morita, W., Morimoto, N., & Jernvall, J. 2020a. Mapping molar shapes on signaling pathways. *PLOS Computational Biology* 16 (12): e1008436, 1–14.
- Morita, W., Morimoto, N., Kono, R. T., & Suwa, G. 2020b. Metameric variation of upper molars in hominoids and its implications for the diversification of molar morphogenesis. *Journal of Human Evolution* 138: 102706, 1–13.
- Morita, W, Morimoto, N., & Ohshima, H. 2016. Exploring metameric variation in human molars: a morphological study using morphometric mapping. *Journal of Anatomy* 229 (3): 343–355.
- Morita, W., Yano, W., Nagaoka, T., Abe, M., Ohshima, H., & Nakatsukasa, M. 2014. Patterns of morphological variation in enamel–dentin junction and outer enamel surface of human molars. *Journal of Anatomy* 224 (6): 669–680.
- Natarajan, S., Ahmed, J., Jose, N. P., & Shetty, S. 2024. Maxillary first premolar shape (and not size) as an indicator of sexual dimorphism: a 2D geomorphometric study. *F1000Research* 11: 433, 1–25.
- Nichol, Ch. R., & Turner, Ch. G. 1986. Intra- and interobserver concordance in classifying dental morphology. *American Journal of Physical Anthropology* 69 (3): 299–315.

- Oliva, G., Pinchi, V., Bianchi, I., Focardi, M., Paganelli, C., Zotti, R., & Dalessandri, D. 2021. Three-dimensional dental analysis for sex estimation in the Italian population: a pilot study based on a geometric morphometric and artificial neural network approach. *Healthcare* 10 (1): 9, 1–10.
- Pampush, J. D., Spradley, J. P., Morse, P. E., Griffith, D., Gladman, J. T., Gonzales, L. A., & Kay, R. F. 2018. „Adaptive wear-based changes in dental topography associated with atelid (Mammalia: Primates) diets". *Biological Journal of the Linnean Society* 124 (4): 584–606.
- Pampush, J. D., Winchester, J. M., Morse, P. E., Vining, A. Q., Boyer, D. M., & Kay, R. F. 2016. Introducing molaR: a new R package for quantitative topographic analysis of teeth (and other topographic surfaces). *Journal of Mammalian Evolution* 23 (4): 397–412.
- Panetta, D. 2014. Computed tomography. In: Budinger, T. F., Panetta, D., Demi, M., Belkić, D., Belkić, K., Alves, F., Kiessling, F., McAdams, E., Gehin, C., Persson, B., Hendry, J., Uesaka, M., Danielsson, M., Brahme, A., Zhou S.-A., & Zhou, L. (eds) *Comprehensive Biomedical Physics*. Elsevier, Amsterdam, pp 65–88.
- Park, J., Baumrind, S., Curry, S., Carlson, S. K., Boyd, R. L., & Oh, H. 2019. Reliability of 3D dental and skeletal landmarks on CBCT images. *The Angle Orthodontist* 89 (5): 758–767.
- Perez, S. I., Bernal, V., & Gonzalez, P. N. 2006. Differences between sliding semi-landmark methods in geometric morphometrics, with an application to human craniofacial and dental variation. *Journal of Anatomy* 208 (6): 769–784.
- Peters, O. A., Laib, A., Rügsegger, P., & Barbakow, F. 2000. Three-dimensional analysis of root canal geometry by high-resolution computed tomography. *Journal of Dental Research* 79 (6): 1405–1409.
- Pietrusewsky, M. 2018. Traditional morphometrics and biological distance: methods and an example. In: Katzenberg, M. A., & Grauer, A. L. (eds) *Biological Anthropology of the Human Skeleton*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, pp 545–591.
- Plotino, G., Grande, N. M., Pecci, R., Bedini, R., Pameijer, C. H., & Somma, F. 2006. Three-dimensional imaging using microcomputed tomography for studying tooth macromorphology. *The Journal of the American Dental Association* 137 (11): 1555–1561.
- Rad, A. E., Rahim, M. S. M., Rehman, A., & Saba, T. 2016. Digital dental X-ray database for caries screening. *3D Research* 7 (2): 18, 1–5.
- Robinson, D. L., Blackwell, P. G., Stillman, E. C., & Brook, A. H. 2001. Planar Procrustes analysis of tooth shape. *Archives of Oral Biology* 46 (3): 191–199.
- Robinson, D. L. 2002. Impact of landmark reliability on the planar Procrustes analysis of tooth shape. *Archives of Oral Biology* 47 (7): 545–554.
- Rohlf, F. J. 1999. Shape statistics: Procrustes superimpositions and tangent spaces. *Journal of Classification* 16 (2): 197–223.
- Scott, G. R., & Potter, R. H. Y. 1984. An analysis of tooth crown morphology in American twins. *Anthropology* 22 (3): 223–231.



- Scott, G. R., & Irish, J. D. 2017. *Human tooth crown and root morphology: The Arizona State University Dental Anthropology System*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Scott, G. R., & Turner, Ch. G. 2008. History of dental anthropology. In: Irish, J. D., & Nelson, G. C. (eds) *Technique and Application in Dental Anthropology*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 10–34.
- Shah, N. 2014. Recent advances in imaging technologies in dentistry. *World Journal of Radiology* 6 (10): 794–807.
- \*Shahbazian, M., & Jacobs, R. 2012. Diagnostic value of 2D and 3D imaging in odontogenic maxillary sinusitis: a review of literature. *Journal of Oral Rehabilitation* 39 (4): 294–300.
- Schulz, R. A., Stein, J. A., & Pelc, N. J. 2021. How CT happened: the early development of medical computed tomography. *Journal of Medical Imaging* 8 (5): 052110, 1–26.
- Schwartz, G. T., & Dean, M. Ch. 2005. Sexual dimorphism in modern human permanent teeth. *American Journal of Physical Anthropology* 128 (2): 312–317.
- Simon, M. N., & Marroig, G. 2015. Landmark precision and reliability and accuracy of linear distances estimated by using 3D computed micro-tomography and the open-source TINA manual landmarking tool software. *Frontiers in Zoology* 12 (1): 12, 1–13.
- Skinner, M. M., Wood, B. A., Boesch, Ch., Olejniczak, A. J., Rosas, A., Smith, T. M., & Hublin, J.-J. 2008. Dental trait expression at the enamel-dentine junction of lower molars in extant and fossil hominoids. *Journal of Human Evolution* 54 (2): 173–186.
- Smith, B. H. 1984. Patterns of molar wear in hunter–gatherers and agriculturalists. *American Journal of Physical Anthropology* 63 (1): 39–56.
- Smith, R., Zaitoun, H., Coxon, T., Karmo, M., Kaur, G., Townsend, G., Harris, E. F., & Brook, A. 2009. Defining new dental phenotypes using 3-D image analysis to enhance discrimination and insights into biological processes. *Archives of Oral Biology* 54: 118–125.
- Somma, F., Leoni, D., Plotino, G., Grande, N. M., & Plasschaert, A. 2009. Root canal morphology of the mesiobuccal root of maxillary first molars: a micro-computed tomographic analysis. *International Endodontic Journal* 42 (2): 165–174.
- Stojanowski, Ch. M., & Hubbard, A. R. 2017. Sensitivity of dental phenotypic data for the identification of biological relatives. *International Journal of Osteoarchaeology* 27 (5): 813–827.
- \*Suomalainen, A., Pakbaznejad Esmaeili, E., & Robinson, S. 2015. Dentomaxillofacial imaging with panoramic views and cone beam CT. *Insights into Imaging* 6 (1): 1–16.
- Tachibana, H., & Matsumoto, K. 1990. Applicability of X-ray computerized tomography in endodontics. *Dental Traumatology* 6 (1): 16–20.
- Thesleff, I. 2000. Genetic basis of tooth development and dental defects. *Acta Odontologica Scandinavica* 58 (5): 191–194.

- Thesleff, I. 2003. Epithelial-mesenchymal signalling regulating tooth morphogenesis. *Journal of Cell Science* 116 (9): 1647–1648.
- Tomaszewska, I. M., Leszczyński, B., Wróbel, A., Gładysz, T., & Duncan, H. F. 2018. A micro-computed tomographic (micro-CT) analysis of the root canal morphology of maxillary third molar teeth. *Annals of Anatomy - Anatomischer Anzeiger* 215: 83–92.
- Townsend, G. C., Richards, L., Hughes, T., Pinkerton, S., & Schwerdt, W. 2005. Epigenetic influences may explain dental differences in monozygotic twin pairs. *Australian Dental Journal* 50 (2): 95–100.
- Turner, Ch. I., Nicol, C. R., & Scott, G. 1991. Scoring procedures for key morphological traits of the permanent dentition: The Arizona State University dental anthropology system. In: Kelley, M. A., & Larsen, C. S. (eds) *Advances in Dental Anthropology*. Wiley-Liss, New York, pp 13–31.
- \*Uhlík Spěváčková, P., & Merglová, V. 2023. Current theoretical and methodological approaches of dental anthropology to the study of tooth morphology. *Česká stomatologie/Praktické zubní lékařství* 123 (2): 41–46.
- Ulhaas, L., Kullmer, O., & Schrenk, F. 2007. Tooth wear and diversity in early hominid molars: a case study. In: Bailey, S. H., & Hublin, J.-J. (eds) *Dental Perspectives on Human Evolution: State of the Art Research in Dental Paleoanthropology*. Springer, Dordrecht, pp 369–390.
- Ungar, P. S. 2004. Dental topography and diets of Australopithecus afarensis and early Homo. *Journal of Human Evolution* 46 (5): 605–622.
- Ungar, P. S. 2006. Dental functional morphology: the known, the unknown, and the unknowable. In: Ungar, P. S (ed) *Evolution Of The Human Diet*. Oxford University Press, New York, pp 39–55.
- Ungar, P. S., & Williamson, M. 1999. Exploring the effects of tooth wear on functional morphology: a preliminary study using dental topographic analysis. *Palaeontologia Electronica* 3 (1): 1, 1–18.
- Varrela, J. 2006. Masticatory function and malocclusion: a clinical perspective. *Seminars in Orthodontics* 12 (2): 102–109.
- Vergès, J. M., Allué, E., Fontanals, M., Morales, J. I., Martín Rodríguez, P., Carrancho, A., Expósito Barea, I., Guardiola, M., Lozano, M., Marsal, R., Oms, F. X., Euba, I., & Rodríguez, A. 2016. El Mirador cave (Sierra de Atapuerca, Burgos, Spain): a whole perspective. *Quaternary International* 414: 236–243.
- Winchester, J. M. 2016. MorphoTester: an open source application for morphological topographic analysis. *PLOS ONE* 11 (2): e0147649, 1–18.
- Wolf, T. G., Basmaci, S., Schumann, S., & Waber, A. L. 2023. Internal morphology of mandibular second premolars using micro-computed tomography. *Journal of Imaging* 9 (12): 257, 1–11.
- \*Wolf, T. G., Kim, P., Campus, G., Stiebritz, M., Siegrist, M., & Briseño-Marroquín, B. 2020. 3-dimensional analysis and systematic review of root canal morphology and physiological foramen geometry of 109 mandibular first premolars by micro-computed tomography in a mixed Swiss-German population. *Journal of Endodontics* 46 (6): 801–809.

- Wood, B. A., & Abbott, S. A. 1983. Analysis of the dental morphology of Plio-Pleistocene hominids. I. mandibular molars: crown area measurements and morphological traits. *Journal of Anatomy* 136: 197–219.
- Wood, B. A., & Uytterschaut, H. 1987. Analysis of the dental morphology of Plio-Pleistocene hominids. III. mandibular premolar crowns. *Journal of Anatomy* 154: 121–156.
- Yanagida, K., Ohya, T., Wang, J., Iwai, T., Izumi, T., Kobayashi, E., Sakuma, I., & Mitsudo, K. 2021. Applicability of a single camera-based catheter navigation system using teeth arch as an anatomical landmark for superselective intraarterial infusion in advanced oral cancer treatment. *Medical & Biological Engineering & Computing* 59 (3): 663–672.
- Yong, R., Ranjitkar, S., Lekkas, D., Halazonetis, D., Evans, A., Brook, A., & Townsend, G. 2018. Three-dimensional (3D) geometric morphometric analysis of human premolars to assess sexual dimorphism and biological ancestry in Australian populations. *American Journal of Physical Anthropology* 166 (2): 373–385.
- Yu, L.-J., Sun, D.-F., Peng, Z.-R., & Zhang, J. 2012. A hybrid system of expanding 2D GIS into 3D space. *Cartography and Geographic Information Science* 39 (3): 140–153.
- Zanolli, C., Davies, T. W., Joannes-Boyau, R., Beaudet, A., Bruxelles, L., De Beer, F., Hoffman, J., Hublin, J.-J., Jakata, K., Kgasi, L., Kullmer, O., Macchiarelli R., Pan, L., Schrenk, F., Santos, F., Stratford, D., Tawane, M., Thackeray, F., Xing, S., Zipfel, B., & Skinner, M. M. 2022. Dental data challenge the ubiquitous presence of Homo in the Cradle of Humankind. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119 (28): e2111212119, 1–11.
- Zink, K. D., Lieberman, D. E., & Lucas, P. W. 2014. Food material properties and early hominin processing techniques. *Journal of Human Evolution* 77: 155–166.
- Zollikofer, Ch. P. E., & De León, M. S. P. 2001. Computer-assisted morphometry of hominoid fossils: the role of morphometric maps. In: Bonis, L. D., Koufos, G. D., & Andrews, P. (eds) *Hominoid Evolution and Climatic Change in Europe: Volume 2: Phylogeny of the Neogene Hominoid Primates of Eurasia*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 50–59.
- Zuccotti, L. F., Williamson, M. D., Limp, W. F., & Ungar, P. S. 1998. Technical note: modeling primate occlusal topography using geographic information systems technology. *American Journal of Physical Anthropology* 107 (1): 137–142.

\* sekundární citace