

Università degli Studi dell'Insubria
Associazione Archeologica "Mario Bertolone" di Angera

Atti del Convegno

**LO STUDIO DELLE OSSA:
METODOLOGIE DELLA MEDICINA
E DELL'ANTROPOLOGIA**

III GIORNATA

27 marzo 2004
Angera (VA), chiesa di S. Alessandro

**TOMOGRAFIA COMPUTERIZZATA E ELABORAZIONE DI IMMAGINI:
MODELLI VIRTUALI PER L'ANTROPOLOGIA**

EMILIANO BRUNER

Dipartimento di Biologia Animale e dell'Uomo
Università La Sapienza
P.le A. Moro 5, 00185 Roma
e-mail: emiliano.bruner@uniroma1.it

INTRODUZIONE

I ritrovamenti scheletrici, sia che provengano da contesti archeologici che paleontologici, presentano una serie di limitazioni che ne decrementano sensibilmente la disponibilità analitica. L'informazione estraibile dalle evidenze osteologiche è spesso condizionata dalla frammentarietà dei reperti, dalle loro condizioni strutturali relativamente fragili, dalla permeazione e inclusione della matrice rocciosa e dei sedimenti geologici, e dalla loro intrinseca importanza che non permette l'applicazione di indagini invasive. Paradossalmente più il reperto è integro, più contiene informazioni, e più queste informazioni sono inaccessibili in quanto condizionate dalla natura stessa del reperto.

Appena si sono rese disponibili le tecniche radiologiche, gli antropologi le hanno utilizzate per poter promuovere analisi anatomiche e morfologiche dei livelli interni e profondi dei volumi scheletrici. Sebbene queste metodologie abbiano rappresentato un notevole progresso analitico nelle discipline coinvolte, non mancano di presentare dei limiti di risoluzione piuttosto evidenti. Le radiografie restituiscono proiezioni simultanee di interi volumi, dove le rispettive strutture risultano sovrapposte e scarsamente distinguibili da quelle adiacenti. Inoltre, il fascio radiattivo produce un errore di parallasse inversamente proporzionale alla distanza tra l'oggetto di scansione e le superfici emittenti e riceventi. Entrambi questi limiti possono avere un'influenza minore nella diagnostica clinica, ma rappresentano un ostacolo rilevante negli studi anatomici e morfologici. Negli anni '70 Godfrey Hounsfield sviluppa la tomografia computerizzata, superando i limiti delle radiografie convenzionali. Nella scansione tomografica, l'oggetto di studio attraversa un piano formato da una sorgente di radiazioni che compie un giro di 360° intorno all'oggetto stesso. Ogni singola scansione rappresenta quindi una sezione specifica dell'oggetto, e restituisce una lastra (su supporto rigido o digitale) dove ogni punto presenta un tono cromatico proporzionale all'attenuazione dei raggi radioattivi al passaggio di quella singola unità volumetrica (*coefficiente di attenuazione*). Ogni unità volumetrica è rappresentata da un coefficiente di attenuazione

ottenuto dall'integrazione di tutte le informazioni provenienti dalla scansione complanare, e non presenta di conseguenza errore di parallasse. La scala cromatica è stata standardizzata secondo una convenzione funzionale, e viene misurata in *Unità Hounsfield (UH)*. L'unità volumetrica (*voxel*) è rappresentata dalla risoluzione analitica sul piano di scansione (in pixel) per lo spessore della lastra (in millimetri). Le lastre possono essere contigue, spaziate, o parzialmente sovrapposte (*embricate*). Le singole lastre permettono un'indagine anatomica e morfologica completa dei volumi scansionati. Inoltre, operando su filtri di selezione e soglie per livelli di attenuazione è possibile isolare solo alcune componenti densità-specifiche come tessuti, strutture, o cavità (*segmentazione*). Le regioni così selezionate sulle singole lastre vengono ricomposte tridimensionalmente tramite elaborazione di immagine e rendering volumetrico. Negli anni '80 le tecniche tomografiche non presentano ancora una risoluzione e una disponibilità sufficiente per competere con le altre metodologie biometriche, ma vengono comunque applicate a reperti fossili per le prime pionieristiche indagini metodologiche soprattutto in Olanda e negli Stati Uniti (Tate & Cann 1982; Conroy & Vannier 1984; Wind 1984; Vannier et al. 1985; Vannier & Conroy 1989a, 1989b; Wind 1989; Zonneveld et al. 1989). Nella seconda metà degli anni '90 la diffusione di software e hardware dedicati e la crescente risoluzione delle tecnologie tomografiche rendono queste tecniche competitive sul piano morfometrico, e ne rivelano le potenzialità descritte nella prima fase esplorativa e metodologica (Zollikofer et al. 1995, 1998; Recheis et al. 1999a). Il termine "*antropologia virtuale*" è stato utilizzato spesso per indicare questo approccio computerizzato allo studio anatomico e morfologico dei resti umani. Considerata la valenza eterogenea del termine *virtuale* nelle società moderne, può risultare più indicativo e appropriato parlare di "*antropologia digitale*", riferendosi propriamente alla codificazione della variabilità morfologica in modelli computerizzati generati e analizzati tramite procedure numeriche. È stato recentemente coniato il termine "*in silico*" per descrivere tutti quei contesti sperimentali che per la loro

natura digitale non possono essere definiti dai termini *in vivo* o *in vitro*, ma che procedono comunque secondo i

paradigmi e le impostazioni strutturali del metodo scientifico.

TOMOGRAFIA COMPUTERIZZATA E ANTROPOLOGIA

L'analisi tomografica si inserisce in tutte le fasi dell'elaborazione di un reperto, dalla sua preparazione alla sua considerazione analitica. I resti scheletrici vengono di solito rinvenuti in sedimenti geologici che incrostano la superficie dell'osso e ne permeano gli spessori e le strutture profonde. La rimozione di questa matrice geologica è spesso difficoltosa o non completamente effettuabile, e rappresenta un rischio per l'integrità del reperto. Se le densità delle matrici fossile/ossea e geologica presentano differenti livelli di attenuazione, un filtro potrà automaticamente risolverle. Lo spettro di attenuazione (che quantifica la rappresentatività di ogni valore densitometrico) dell'intero reperto fornisce una stima di quanto questa separazione sia effettuabile tramite soglie di densità (Fig. 1). La possibilità di distinguere le due matrici dipende dalle condizioni di fossilizzazione e della

composizione qualitativa del sedimento, ma non necessariamente dall'antichità del reperto (Fig. 2). Successivamente, è possibile assemblare i frammenti che compongono i reperti virtualmente, senza ricorrere all'utilizzo solo parzialmente reversibile di sostanze invasive (e.g. Thomson & Illerhaus 1998). Analizzando i livelli di attenuazione è possibile condurre uno studio strutturale sul reperto, che ne individui i volumi più fragili, quelli più pesanti, o ne riveli indicazioni quali la presenza di linee profonde di frattura. Tutte queste procedure assicurano una conoscenza del reperto necessaria alla conservazione e all'eventuale restauro fisico degli esemplari. Operazioni di deformazione dei volumi possono essere effettuate sul reperto digitale per comprendere e contrastare gli effetti delle distorsioni causate dai processi diagenetici.

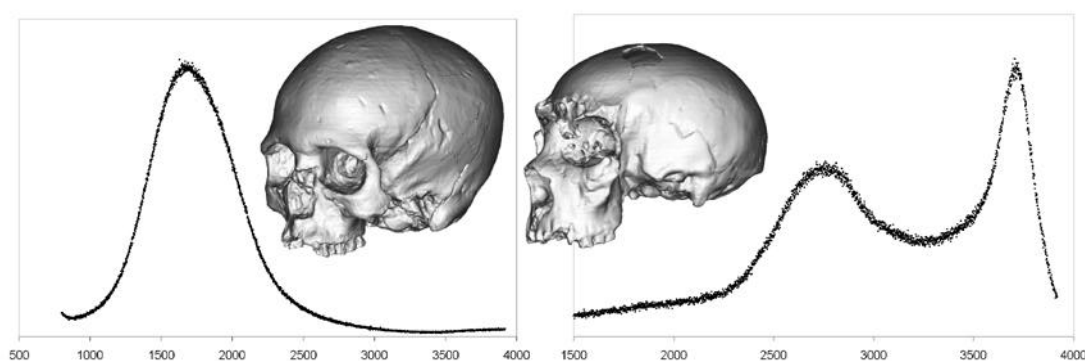


Fig. 1: spettro di attenuazione (UH) e ricostruzione virtuale dei crani fossili di Fonterossi (sinistra) e Saccopastore 1 (destra). Il cranio di Fonterossi (Abruzzo, 6,5 ka - Bruner & Manzi 2003) presenta una distribuzione unimodale, mentre il cranio di Saccopastore 1 (Roma, 120 ka - Manzi et al. 2001) presenta due fasi relativamente distinte.

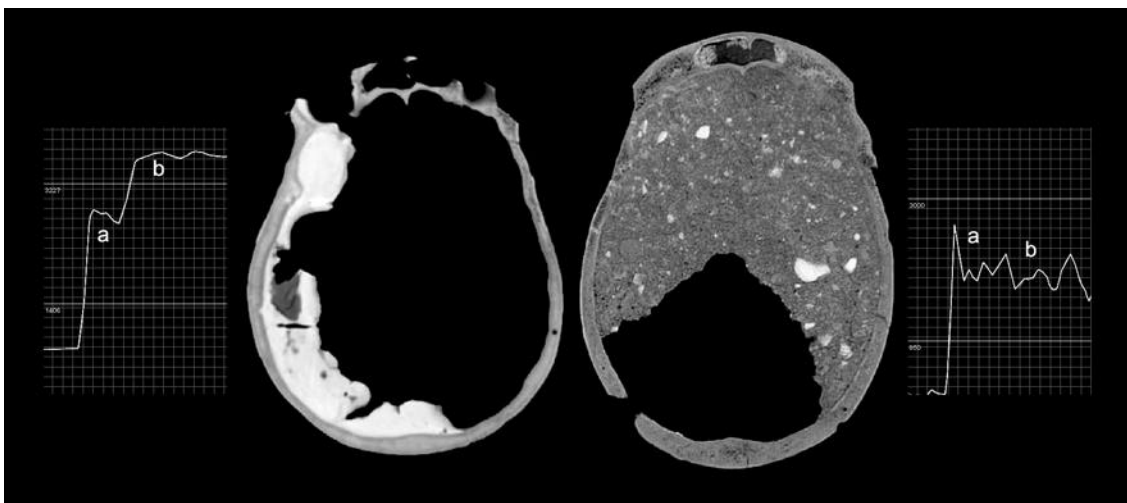


Fig. 2: sezione trasversale e curva di attenuazione tra matrice fossile (a) e rocciosa (b) dei fossili di Saccopastore 1 (sinistra) e Fonterossi (destra). Il cranio di Saccopastore 1 mostra una differenza discreta tra le due matrici, mentre nel cranio di Fonterossi si osserva una situazione eterogenea e non risolvibile tramite selezione della soglia di attenuazione.

Le strutture anatomiche interne possono essere ricostruite virtualmente, permettendo l'utilizzo integrale delle informazioni morfologiche contenute nei reperti (Fig. 3). La ricostruzione di calchi endocranici virtuali ha recentemente permesso un considerevole sviluppo nelle analisi paleoneurologiche (Tobias 2001; Bruner 2003), con casi studio provenienti dalla maggior parte dei taxa estinti (e.g. Conroy et al. 1990, 1998, 2000a, 2000b; Recheis et al. 1999b; Bruner et al. 2002)

Le stesse tecniche vengono utilizzate per l'analisi dei seni paranasali e delle strutture pneumatiche (Thomson & Illerhaus 1998; Manzi et al. 2001; Bruner & Manzi 2002; Bruner & Manzi 2003; Prossinger et al. 2003), delle strutture dentarie e della distribuzione dello spessore osseo (Spoor et al. 1993; Weber & Kim 1999), o delle strutture vestibolari dell'orecchio interno (Spoor & Zonneveld 1995).

Infine, un discorso a parte meritano le implicazioni museologiche, didattiche e divulgative. Le ricostruzioni virtuali, per la loro natura grafica e la loro disponibilità digitale, si prestano a tutte quelle situazioni basate su un contatto visivo, come in contesti espositivi o

representativi. Sui reperti incompleti è possibile inoltre effettuare delle ricostruzioni virtuali delle parti mancanti, basandosi sulle strutture controlaterali o su l'interpretazione delle strutture contigue (Fig. 4). In questo caso l'informazione aggiunta non è ovviamente utilizzabile per scopi analitici perché derivata su base ipotetica, ma è comunque un'indicazione utile per contesti di immagine e per considerazioni di natura descrittiva. Tramite tecniche di prototipaggio rapido è oltretutto possibile ottenere delle repliche fisiche a partire dalle ricostruzioni virtuali (*stereolitografie*), utilizzando resine epossidiche che polimerizzano a strati sotto induzione di un fascio laser (Zur Nedden et al. 1994; Hjalgrim et al. 1995; Seidler et al. 1997).

A metà tra inferenza e analisi c'è la possibilità di ricostruire a partire dai resti disponibili la morfologia dei tessuti molli originari (*morphing*). Queste tecniche sono soprattutto applicate alla ricostruzione della morfologia facciale, e se hanno solo una valenza iconografica nei contesti paleontologici e archeologici possono invece rappresentare delle risorse applicate nell'antropologia forense.

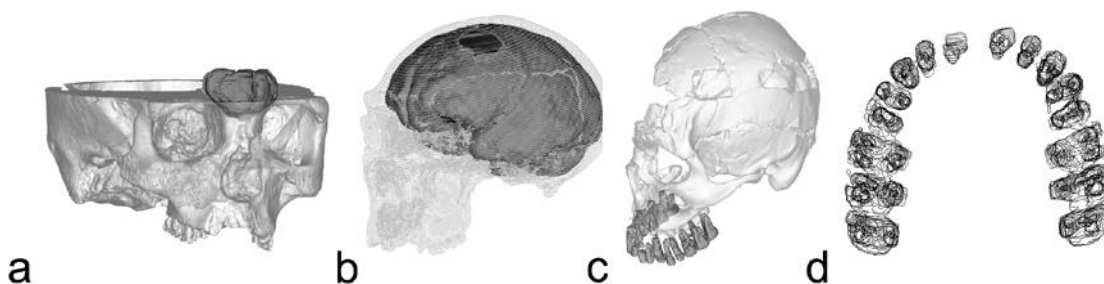


Fig. 3: elaborazione virtuale e riproduzione volumetrica di strutture anatomiche interne; a) sezione della ricostruzione virtuale del cranio di Fonterossi con i seni frontali in evidenza (Bruner & Manzi 2003); b) ricostruzione del calco endocranico di Saccopastore 1 (Bruner et al. 2002); c) ricostruzione del cranio di Nazlet Khater (Egitto, 35 ka - Bruner & Manzi 2002), con le strutture dentarie ingrandite e in evidenza; d) curve di superficie ottenute dalla segmentazione delle strutture dentarie della mascella di Nazlet Khater.

CONSIDERAZIONI METODOLOGICHE

Le macchine tomografiche disponibili in genere nei centri ospedalieri sono ideate e calibrate per funzioni diagnostiche biomediche. L'elevata densità delle matrici fossili e sedimentarie, la particolare composizione dei reperti, e la necessità di accuratezza richiesta in queste analisi possono incontrare una serie di difficoltà nella scansione tomografica (Spoor et al. 2000a, 2000b). La scala densitometrica risulta spesso saturata da valori oltre la soglia convenzionale, producendo plateau ai livelli massimi della scala cromatica (*white overflow*) o al contrario delle cadute fittizie dei valori (*black overflow*). Il risultato è una copertura delle strutture interessate e una deformazione di quelle contigue, e richiede una ricalibrazione della scala densitometrica o una estensione della scala cromatica. Lo spessore o la densità dei volumi possono arrivare ad attenuare il segnale totalmente. In assenza di ricezione del segnale si creano delle striature nere e artefatti grafici che limitano la corretta elaborazione delle immagini. Un aumento di potenza dell'emissione può riuscire a limitare l'effetto, ma in genere si preferisce aumentare lo spessore delle scansioni, perdendo una certa quantità di informazione. L'assorbimento differenziale

delle componenti ad alta e a bassa energia - soprattutto causato dalla rifrazione elevata tra aria e materiale ad alta densità - produce inoltre un indurimento del fascio in uscita che produce ulteriori artefatti e sottostima i valori registrati. Anche in questo caso può essere necessaria una calibrazione apposita, o l'interposizione di materiale di passaggio tra fossile e aria (plexiglass, acqua). La condizione comunque più importante ai fini della riuscita della scansione è la possibilità di esportazione dei dati in formato digitale, su supporti convenzionali (CDrom) e in formati internazionali (DICOM).

Una nota a parte merita l'orientamento della scansione. Una volta acquisite le singole lastre, è possibile ricostruire virtualmente per interpolazione qualunque sezione utile (*rimformattazione multiplanare*). Comunque, il piano di scansione resterà sempre quello a risoluzione maggiore e con una migliore disponibilità di elaborazione. È molto utile quindi progettare la scansione sul piano che si ritiene più informativo per un determinato studio (piano di Francoforte, piano sagittale mediano, piano otoradiologico, etc.).

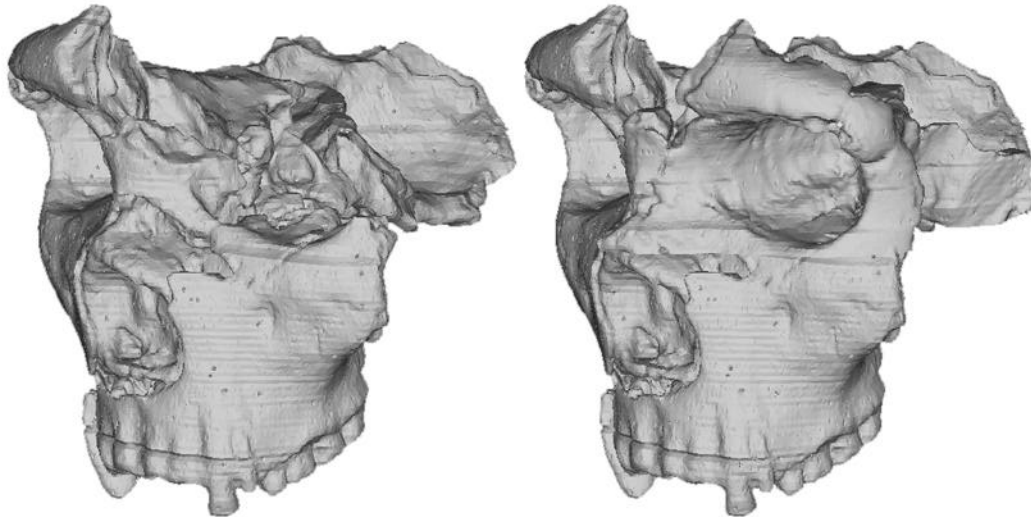


Fig. 4: replica tomografica del fossile di Saccopastore 2 (Roma, 120 Ka) e ricostruzione virtuale dell'area orbitale sinistra.

ANTROPOLOGIA DIGITALE, ETICA, E LEGISLAZIONE

Spesso i reperti paleontologici e archeologici rappresentano una risorsa economica e culturale per i Paesi e le istituzioni che li custodiscono. Risorsa economica, perché sono la base per esposizioni e mostre, e possono rappresentare iconograficamente e concettualmente alcuni investimenti turistici. Inoltre, il loro utilizzo in contesti nazionali e internazionali comporta finanziamenti e gestione di fondi, indispensabili per un certo livello di ricerca e di investimento sociale. Risorsa culturale, perché le istituzioni coinvolte possono essere inserite in contesti internazionali e venire incluse in network di informazioni (studio, ricerca) altrimenti estranei ai circuiti locali. Queste considerazioni devono essere valutate con cura alla luce delle potenzialità tecnologiche della tomografia computerizzata e dell'elaborazione di immagini,

soprattutto considerando che nel caso della Paleontologia Umana molti reperti sono rinvenuti e custoditi in Paesi in via di sviluppo. La possibilità di riprodurre integralmente l'anatomia e la morfologia dei reperti ed esportare l'informazione al di fuori del contesto di origine è un ottimo e potente strumento di divulgazione e condivisione del sapere (Weber 2001). Ma se queste nuove potenzialità non vengono utilizzate unitariamente ad una nuova richiesta etica (e probabilmente legislativa) si possono facilmente trasformare in un ennesimo strumento di depredazione delle risorse e centralizzazione delle conoscenze da parte di quei Paesi e di quelle istituzioni che possono permettersi una gestione molto elaborata delle possibilità umane e tecnologiche.

RINGRAZIAMENTI

I lavori presentati in questo contributo sono stati sviluppati presso il Laboratorio di Paleontologia Umana del Dipartimento di Biologia Animale e dell'Uomo dell'Università di Roma La Sapienza, coordinato da Giorgio Manzi e diretto da Pietro Passarelli. Patricio Dominguez e Karl Lafaut hanno contribuito all'elaborazione di immagini. Pierre Vermeersch ha permesso la scansione e lo studio del cranio di Nazlet Khater. Gianfranco Gualdi e Marleen Smet hanno diretto le scansioni tomografiche. Un ringraziamento particolare va a Anna Sassi e agli organizzatori di questo convegno, per aver promosso questo incontro ed aver prodotto questo risultato. I progetti sono cofinanziati dal Ministero dell'Istruzione, dell'Università, e della Ricerca.

RIASSUNTO

La risoluzione attuale delle tecniche tomografiche e la distribuzione dei software di elaborazione di immagine forniscono uno strumento di indagine anatomica e morfologica estremamente utile nelle discipline antropologiche e paleontologiche. La scansione di fossili e in genere di reperti osteologici permette la riproduzione digitale di tutte le superfici e i volumi interni e esterni, rendendone integralmente disponibile le informazioni strutturali. Possono essere considerate le condizioni di conservazione del reperto per la sua gestione o per interventi di restauro. I frammenti possono essere assemblati virtualmente, e le parti mancanti ricostruite su base digitale. Le ricostruzioni tomografiche sono particolarmente utilizzate per lo studio della cavità endocranica, dei seni paranasali e delle strutture pneumatiche, dei denti, e degli spessori ossei. Le potenzialità di queste tecnologie e lo sviluppo dell'antropologia digitale rendono necessaria una specifica impostazione etica sulla gestione dei patrimoni culturali, e richiedono lo sviluppo di adeguati strumenti legislativi.

SUMMARY

[Computed tomography and image analysis: virtual models for Anthropology]

The development and availability of the tomographic techniques with the related software packages represent one of the most powerful analytical tool in morphology and anatomy. Human remains from archeological and paleontological contexts can be entirely reproduced by means of digital imaging, allowing the access to the whole structural information available within their outer and inner volumes and surfaces. These techniques represent the source of the "virtual anthropology". Considering the general implications of such terms, it would be better to use "digital anthropology" to describe these procedures aimed at coding the morphological variability into computed models. CT data can be used to promote a structural analysis of the specimen itself, aimed at preservation and restoration managing. Bone and geological matrices can be separated avoiding damages and direct procedures on the specimens. Fragments can be assembled and integrated by digital operations, and missing parts can be reproduced for museological purposes. The inner structures can be virtually reconstructed, including volumes and surfaces from the endocranium, paranasal sinuses, dental roots and enamel, bone thickness. It is worth noting that new ethical problems can arise because of the digital availability of important and rare resources. A new legislative approach will be required to improve communication without promote deprecation of cultural and economic supports, and to avoid a massive centralisation of knowledge.

BIBLIOGRAFIA

- BRUNER E. 2003: *Fossil traces of the human thought: paleoneurology and the evolution of the genus Homo*. Rivista di Antropologia 81, pp. 29-56.
- BRUNER E., MANZI G. 2002: *The virtual replica of Nazlet Khater, Egypt. Cranium and mandible: first results*. In P. Vermeersch (Ed.) "Paleolithic Quarrying Sites in Upper and Middle Egypt" pp. 337-345. Leuven University Press, Leuven.
- BRUNER E., MANZI G., PASSARELLO P. 2002: *The "Virtual" Endocast of Saccopastore 1. General Morphology and Preliminary Comparisons by Geometric Morphometrics*. In B. Mafart & H. Delingette (eds) "Three-Dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archaeology", British Archeol. Records IS 1049 pp. 17-24. Archeopress, Oxford.
- BRUNER E., MANZI G. 2003: *Towards a re-appraisal of the Early Neolithic skeleton from Lama dei Peligni (Abruzzo, Italy). Computed tomography and 3D reconstruction of the cranium*. Rivista di Antropologia 81, pp. 69-78.
- CONROY G., VANNIER M. 1984: *Noninvasive three-dimensional computer imaging of matrix-filled fossil skulls by high-resolution computed tomography*. Science 226, pp. 456-226.
- CONROY G., WEBER G., SEIDLER H., TOBIAS P., KANE A., BRUNSDEN B. 1998: *Endocranial capacity in an early hominid cranium from Sterkfontain, South Africa*. Science 280, pp. 1730-1731.
- CONROY G.C., VANNIER M.W., TOBIAS P.V. 1990: *Endocranial features of Australopithecus africanus revealed by 2- and 3- D computed tomography*. Science 247, pp. 838-841.
- CONROY G., WEBER G., SEIDLER H., RECHEIS W., ZUR NEDDEN D., MARIAM J.H. 2000a: *Endocranial capacity of the Bodo cranium determined from three-dimensional computed tomography*. Am. Journ. Phys. Anthropol. 113, pp. 111-118.
- CONROY G.C., FALK D., GUYER J., WEBER G.W., SEIDLER H., RECHEIS W. 2000b: *Endocranial capacity in Sts 71 Australopithecus africanus by three- dimensional computed tomography*. Anat. Rec. 258, pp. 391-396.
- HJALGRIM H., LYNNERUP N., LIVERSAGE M., ROSENKLINT A. 1995: *Stereolithography: potential applications in anthropological studies*. Am. Journ. Phys. Anthropol. 97, pp. 329-333.
- MANZI G., BRUNER E., CAPRASECCA S., GUALDI G., PASSARELLO P. 2001: *CT- scanning and virtual reproduction of the Saccopastore Neandertal crania*. Rivista di Antropologia 79, pp. 61-72.

- PROSSINGER H., SEIDLER H., WICKE L., WEAVER D., RECHEIS W., STRINGER C., MULLER G.B. 2003: *Electronic removal of encrustation inside the Steinheim cranium reveals paranasal sinus features and deformations, and provides a revised endocranial volume estimate*. *Anat. Rec. New Anat.* 273B, pp. 132-142.
- RECHEIS W., WEBER G.W., SCHAFFER K., PROSSINGER H., KNAPP R., SEIDLER H., ZUR NEDDEN D. 1999a: *New methods and techniques in anthropology*. *Coll. Antropol.* 23, pp. 495-509.
- RECHEIS W., MACCHIARELLI R., SEIDLER H., WEAVER D.S., SCHAFFER K., BONDIOLI L., WEBER G.W., ZUR NEDDEN D. 1999b: *Re-evaluation of the endocranial volume of the Guattari 1 Neandertal specimen Monte Circeo*. *Coll. Antropol.* 23, pp. 397-405.
- SEIDLER H., FALK D., STRINGER C., WILFING H., MULLER G.B., ZUR NEDDEN D., WEBER G.W., REICHEIS W., ARSUAGA J.L. 1997: *A comparative study of stereolithographically modelled skulls of Petralona and Broken Hill: implications for future studies of Middle Pleistocene hominid evolution*. *Journ. Hum. Evol.* 33, pp. 691-703.
- SPOOR F., ZONNEVELD F., MACHOG. 1993: *Linear measurements of cortical bone and dental enamel by Computed Tomography: applications and problems*. *Am. Journ. Phys. Anthrop.* 91, pp. 469-484.
- SPOOR F., ZONNEVELD F. 1995: *Morphometry of the primate bony labyrinth: a new method based on high-resolution computed tomography*. *Journ. Anat.* 186, pp. 271-286.
- SPOOR F., JEFFERY N., ZONNEVELD F. 2000a: *Imaging skeletal growth and evolution*. In P. O'Higgins & M. Cohn (eds) "Development, growth and evolution", pp. 123-161. Academic Press, London.
- SPOOR F., JEFFERY N., ZONNEVELD F. 2000b: *Using diagnostic radiology in human evolutionary studies*. *Journ. Anat.* 197, pp. 61-76.
- TATE, J.R., CANN, C.E. 1982. *High-resolution computed tomography for the comparative study of fossil and extant bone*. *Am. J. phys. Anthrop.* 58, pp. 67-73.
- THOMPSON J.L., ILLERHAUS B. 1998: *A new reconstruction of the Le Moustier 1 skull and investigation of internal structures using 3D-mCT data*. *Journ. Hum. Evol.* 35, pp. 647-665.
- TOBIAS P.V. 2001: *Re-creating ancient hominid virtual endocasts by CT-scanning*. *Clin. Anat.* 14, pp. 134-141.
- VANNIER M.W., CONROY G.C., MARSH J.L., KNAPP R.H. 1985: *Three-dimensional cranial surface reconstructions using high-resolution computed tomography*. *Am. Journ. Phys. Anthrop.* 67, pp. 299-311.
- VANNIER M.W., CONROY G.C. 1989a: *Imaging workstation for computer-aided primatology: promises and pitfall*. *Folia Primatol.* 53, pp. 7-21.
- VANNIER M.W., CONROY G.C. 1989b: *Three dimensional surface reconstruction software system for IBM personal computers*. *Folia Primatol.* 53, pp. 22-32.
- WEBER, G.W. (2001). *Virtual anthropology (VA): a call for glasnost in paleoanthropology*. *Anat. Rec.* 265, pp. 193-201.
- WEBER G.W., KIM J. 1999: *Thickness distribution of the occipital bone – A new approach based on CT-data of modern humans and OH9H. ergaster*. *Coll. Antropol.* 23, pp. 333-343.
- WIND J. 1984: *Computerized x-ray tomography of fossil hominid skulls*. *Am. Journ. Phys. Anthrop.* 63, pp. 265-282.
- WIND J. 1989: *Computed tomography of an Australopithecus skull Mrs Ples: a new technique*. *Naturwissenschaften* 76, pp. 325-327.
- ZOLLIKOFER C.P.E., PONCE DE LEÓN M.S., MARTIN R.D., STUCKI P. 1995: *Neanderthal computer skull*. *Nature* 375, pp. 283-285.
- ZOLLIKOFER C.P.E., PONCE DE LEÓN M.S., MARTIN R.D. 1998: *Computer assisted paleoanthropology*. *Evol. Anthrop.* 6, pp. 41-54.
- ZONNEVELD F., SPOOR F., WIND J. 1989: *The use of CT in the study of the internal morphology of hominid fossils*. *Medicamundi* 34, pp. 117-129.
- ZUR NEDDEN D., KNAPP R., WICKE K., JUDMAIER W., MURPHY W., SEIDLER H., PLATZER W. 1994: *Skull of a 5,300-year-old mummy: reproduction and investigation with CT-guided stereolithography*. *Radiology* 193, pp. 269-272.