

Modelagem 3D e suas aplicações na pesquisa paleontológica

Ulisses Dardon

Laboratório de Macrofósseis, Departamento de Geologia - UFRJ. Av. Athos da Silveira Ramos, 274, CCMN, Ilha do Fundão, 21941-916, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. dardonn@gmail.com

Rodrigo Siqueira de Souza

Laboratório de Neuroanatomia Comparada - UFRJ. Centro de Ciências da Saúde, Bloco F Sala F1-001, Cidade Universitária, 21941-590, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. rodrigokazu68@gmail.com

Carla Terezinha Serio Abranches, LÍlian Paglarelli Bergqvist

Laboratório de Macrofósseis, Departamento de Geologia/UFRJ. Av. Athos da Silveira Ramos, 274, CCMN, Ilha do Fundão, 21941-916, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. carlaabbranches2004@yahoo.com.br, bergqvist@geologia.ufrj.br

RESUMO

A técnica de modelagem computacional tridimensional consiste na aquisição de medidas lineares ou imagens de um objeto através de distintos métodos, para posterior inserção em programas geradores de modelos. A aquisição dos dados pode ser feita através de medidas tomadas manualmente das três dimensões do material estudado ou através de fotogrametria, com ou sem base de calibração, videogrametria com laser traço e *webcam*, com projeção de padrões de luz branca, lasers *scanners* 3D (mão e mesa) e tomógrafo. Na Paleontologia, a modelagem 3D pode servir como ferramenta para trabalhos que envolvam estudos de morfologia e biomecânica, no cálculo mais preciso da massa corpórea, para a observação do centro de massa, volume e postura, e em estudos miológicos e de formação de tecidos. Possibilita ainda efetuar correções estruturais e simular o organismo em vida, assim como serve de importante ferramenta para a divulgação científica. No presente estudo, foram testados vários métodos de captura de imagem e de modelagem 3D em fósseis, buscando avaliar sua resolução e operacionalidade, além de identificar vantagens de sua aplicação na Paleontologia. A videogrametria de laser traço e *webcam* demonstrou ser o método mais econômico, enquanto a videogrametria com projeção de padrões de luz branca mostrou-se a mais precisa e acurada, sendo especialmente útil em materiais pequenos. Alguns exemplos de aplicabilidade da técnica são igualmente apresentados.

Palavras-chave: modelagem 3D, paleontologia, mamíferos, divulgação científica.

ABSTRACT

THREE-DIMENSIONAL COMPUTER MODELING TECHNIQUE AND ITS APPLICATIONS IN PALEONTOLOGY. The three-dimensional computer modeling consists in acquiring of linear measurements or images of an object, through different methodologies, and the subsequent data insertion in software modeling programs. The acquisition of data can be accomplished through manual measurement of the object dimensions or through photogrammetry, with or without calibration base, videogrammetry with laser trace and webcam, white light projection, 3D laser-scanners (hand and table), and tomography. In paleontology 3D modeling may serve as a tool in works involving morphological and biomechanical studies, in the precise calculation of corporal mass, center of mass observation, volume and posture, and in studies of myological and tissue formation. It also enables structural corrections, simulation of living organisms, and it serves as a tool for disseminate scientific works. In this study, several fossil images was captured and tested in distinct 3D modeling methods to evaluate resolution, operating efficiency, and advantages of its application on paleontological studies. Videogrammetry with laser trace and webcam proved to be the most economic methodology, while videogrammetry with white light projection was the most precise and accurate, being specifically helpful on small samples. Some application examples are also presented.

Key words: three-dimensional computer modeling, paleontology, mammal bones, scientific education.

INTRODUÇÃO

A Paleontologia se ocupa de todos os aspectos, estruturas e particularidades dos fósseis, buscando sua interpretação através de parâmetros homólogos encontrados em organismos modernos.

Deste modo, extrapola a simples descrição, ocupando-se também dos aspectos paleobiológicos relacionados aos organismos pretéritos (Cassab, 2004).

A técnica de modelagem tridimensional é uma ferramenta que, tradicional e originalmente aplicada na

comunicação visual, expandiu seu uso à Medicina (Verediana e Hermosilla, 2005), à Engenharia (Damasceno *et al.*, 2009), à Odontologia (Foggiatto, 2006) e à Arqueologia (Brancaglioni Jr., 2009). Mais recentemente, sua utilidade no tratamento dos fósseis foi descoberta,

pelas amplas possibilidades que oferece de avaliar e expressar a tridimensionalidade de organismos extintos, uma vez que o registro bidimensional é o único disponível (Figgins, 2001).

Dessa forma, pode-se dizer que modelos 3D permitem, por exemplo, uma visão prévia dos fósseis inseridos em um bloco, orientando a preparação do exemplar (Azevedo e Carvalho, 2009). Ainda que raios X também sejam úteis para esse fim, além de menos onerosos e mais precisos para fornecer uma visão da extensão do fóssil no eixo horizontal da rocha, não permitem a percepção adequada, por exemplo, da ocorrência de ossos superpostos no eixo vertical.

Os modelos 3D possibilitam ainda corrigir virtualmente fendas e pequenas rachaduras em ossos e dentes, produzindo uma amostra mais completa e real do organismo em estudo (Wilhite, 2003). Além disso, tais modelos permitem que se realize virtualmente uma nova desarticulação dos componentes do esqueleto, visando a seu estudo, mesmo em organismos montados para exposições públicas (Smith e Strait, 2008; Sellers *et al.*, 2009).

Sutton *et al.* (2001) ressaltam a facilidade de observação da estrutura morfológica dos fósseis através do manuseio virtual, principalmente de materiais que são demasiadamente grandes ou muito pequenos, ou quando a manipulação física é difícil.

Apesar desses aspectos positivos, a técnica de modelagem tridimensional ainda não tem sido amplamente empregada na pesquisa paleontológica brasileira, como revela o ainda pequeno número de trabalhos listados por Azevedo *et al.* (2010), em parte pelo desconhecimento das vantagens da técnica mas também pelos custos envolvidos.

Azevedo *et al.* (1994) foram pioneiros na tentativa de popularizar a aplicabilidade da técnica 3D na Paleontologia no Brasil, seguidos por vários trabalhos e breves comunicações que enfocavam a aplicabilidade da técnica (Rehem *et al.*, 2007; Azevedo e Carvalho, 2009; Azevedo *et al.*, 2010). Nesse sentido, o presente trabalho objetiva testar e apresentar estas aplicações através do uso

das diferentes ferramentas disponíveis e de sua avaliação crítica. Fornece, ainda, uma síntese dos trabalhos prévios nesta área em várias partes do mundo e de seus resultados.

METODOLOGIA

Os testes foram realizados com diferentes fósseis e partes do esqueleto, enfocando restos de mamíferos procedentes da Bacia de São José de Itaboraí, Rio de Janeiro, pertencentes à coleção de mamíferos fósseis do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) do Rio de Janeiro, cedidos por empréstimo ao Laboratório de Macrofósseis do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Foram utilizados materiais pertencentes às espécies *Carodnia vieirai* Paula-Couto, 1952, um Xenungulata (Carodniidae) e *Paulacontioia protocenicica* Paula-Couto, 1952, um Condylarthra (Didolodontidae).

Para a realização do teste com o método Fotogrametria com base de calibração foram impressas bases de calibração com diâmetro da circunferência interior proporcional ao volume do material fotografado, ou seja, 150 mm para a falange ungual e 350 mm para o úmero de *Carodnia vieira*. Este protocolo é o proposto pelo programa *3D Software Object Modeller* ou 3D SOM (Creative Dimension Software, 2005), que ainda possibilita outros ajustes, conforme a necessidade do usuário. O local escolhido para a realização das fotos foi iluminado de maneira a evitar sombras, e o fóssil foi mantido estável, com apoio em uma base de massa de modelar (plastilina). As fotos foram tomadas com câmera digital Sony Cyber-Shot DSC-H20, resolução de 10 Mpx, acoplada a um tripé. Para cada um dos ângulos (30°, 45° e 65°) foram tomadas quinze fotos, com a câmera posicionada em relação à base de calibração. Após cada foto, a base de calibração é girada no sentido horário em 24°.

O protocolo dos testes com o método de videogrametria com laser traço e *webcam* DAVID 3D (David Laserscanner 3D, 2009) selecionou o fundo de cali-

bração, entre os disponibilizados pelo equipamento e adequados ao tamanho do material. Após o posicionamento e a estabilização com plastilina sobre a plataforma fornecida pelo equipamento, as imagens foram capturadas através de contínuos e lentos movimentos do laser traço sobre a superfície do material fóssil. Estes devem ser repetidos até que se formem imagens do objeto em uma malha tridimensional, observada em tempo real no computador. A *webcam*, que faz a captura da imagem resultante do *scanner* com laser traço, é posicionada a uma distância que enquadre todo o fundo de calibração, em um ângulo de aproximadamente 30°. Diferentemente do método anterior, a base permanece fixa e os espécimes são girados manualmente até que todas as suas faces tenham sido expostas ao traço de laser. Cerca de 20 malhas foram feitas para cada um dos ossos testados, sendo posteriormente fusionadas pelo software que acompanha o equipamento (Figura 1).

No processo de digitalização através do método videogrametria com projeção de padrões de luz branca, todos os fósseis foram primeiramente recobertos com uma fina camada do revelador não aquoso SKD-S2 ou cloreto de amônia, para tornar a superfície opaca, utilizou-se o equipamento de *scanner* SPATIUM 3D (Spatium FMM 3D Scanner, 2008). Foram tomadas de oito a dez fotos do fóssil e, após, este foi girado manualmente no sentido horário, até que toda a superfície tivesse sido varrida. Os fósseis foram posicionados sobre uma base giratória com 120 pontos de calibração dispostos aleatoriamente, de modo a fornecer as coordenadas de localização exata do objeto. Ao final da digitalização, as malhas foram fusionadas pelo software do equipamento, gerando um modelo 3D em formato *.gpd. O arquivo obtido foi tratado no programa GEOMAGIC STUDIO 10 (Geomagic Studio, 2010) para unificação dos pontos da malha e melhoramento da qualidade da superfície do modelo tridimensional.

Alguns dos programas utilizados são versões “trial” ou “demo”, como o 3D SOM, o *Photomodeler Scanner*, o *Photomodeler*

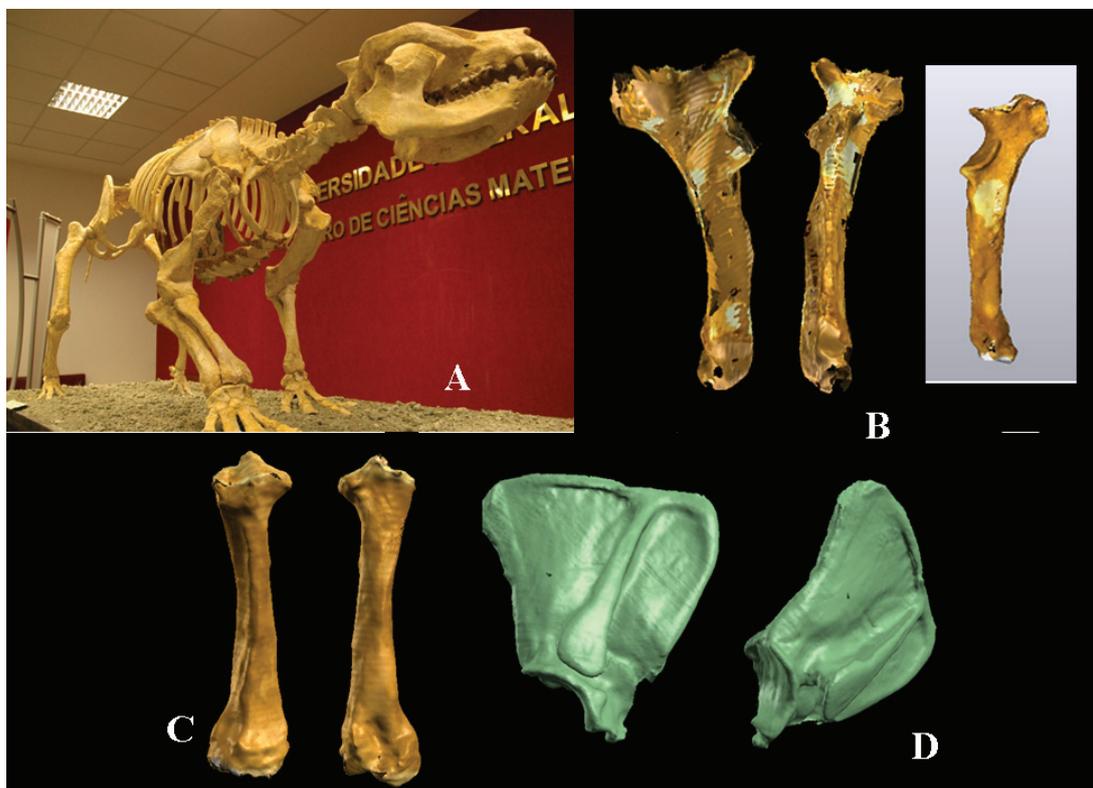


Figura 1. A. Esqueleto de *Carodnia vieirai* Paula-Couto, 1952, exposto na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). B. Geração de imagens 3D com o *David Laserscanner* da ulna (à esquerda) e após a reparação com o programa *Geomagic Studio* (à direita); C. modelo tridimensional do rádio; D. modelo 3D da escápula.

Figure 1. A. *Carodnia vieirai* Paula-Couto, 1952, a nearly complete skeleton mounted at Federal University of Rio de Janeiro, Brazil. B. 3D image of the ulna obtained with *David Laserscanner* program (left) and its repairing with the software *Geomagic Studio* (right); C. 3D model of radio; D. 3D model of the scapula.

PRO 5 (Eos Systems Inc., 2009) e o *3D Doctor* (2010). O *Geomagic Studio* utilizado encontra-se no Laboratório do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, e o *NextEngine* no Departamento de Geologia e Paleontologia do Museu Nacional/UFRJ. O *David Laserscanner* é licenciado no Laboratório de Macrofósseis do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

TÉCNICAS DE GERAÇÃO COMPUTACIONAL DE MODELOS TRIDIMENSIONAIS

As técnicas de modelagem computacional tridimensional podem ser divididas em dois grupos, aqui tratadas como métodos, de acordo com o processo envolvido na aquisição dos dados. O método direto é aquele em que o objeto 3D é obtido a

partir de medidas lineares do material (Hayasaki e Capello Sousa, 2006). O método indireto, mais utilizado, consiste na formação do modelo 3D a partir da digitalização do material através de diferentes meios, tais como fotogrametria, *scanner* 3D, videogrametria e tomografia computadorizada (Rezende, 2006).

MÉTODO DIRETO

Nesta metodologia, as imagens 3D são geradas a partir de um grande número de medidas de comprimento, altura e largura do objeto a ser modelado, tomadas manualmente (Hayasaki e Capello Sousa, 2006). Sua modelagem também é manualmente realizada em um programa CAD (*Computer Aided Design*), o que torna o método mais lento e trabalhoso. No entanto, é de custo computacional baixo, uma vez que

não necessita de componentes adicionais, como placas de vídeo e grande memória RAM. Além disso, o modelo 3D pode ser gerado em qualquer programa CAD, tal como o *Autocad 3D*®, da AutoDesk, ou o *Solidworks*®, da SolidWorks Co.

Ainda, salienta-se que é um método pouco apropriado para estudos morfológicos, por não possibilitar a obtenção de detalhes mais finos do material, mas faz-se útil para aqueles cujos valores de massa, volume, centro de massa e inércia são necessários (Henderson, 1999).

MÉTODOS INDIRETOS

Fotogrametria com base de calibração

Todas as técnicas de Fotogrametria Digital estão inseridas na fotogrametria,

que trata dos aspectos geométricos do uso de fotografias, com a finalidade de obter valores precisos de comprimentos, alturas e formas, baseando-se nas imagens digitais, armazenadas em meio magnético, na forma de pixels, ela é totalmente baseada no princípio da estereoscopia e na orientação analítico-digital das fotos (Milkhai *et al.*, 2001).

Conhecido na área de desenho gráfico como *2D to 3D*, nas ciências geológicas é mais comum a utilização do termo fotogrametria (Grillo, 2004; Petti *et al.*, 2008; Remondino *et al.*, 2010). Consiste na tomada de várias fotos do objeto, utilizando um padrão métrico ou uma base de calibração obtida por intermédio do próprio programa, cujo diâmetro é definido de acordo com o tamanho do fóssil a ser fotografado (Figura 2). A base tem a função de dar coordenadas ao programa sobre a posição exata da câmera em relação ao objeto, possibilitando assim a perfeita fusão das imagens para a geração do modelo 3D. É necessário que se providencie um fundo neutro, de cor antagônica àquela predominante no material, para que o programa reconheça somente o fóssil ao gerar o modelo 3D.

Na formação de um objeto tridimensional são necessárias, em média, de 30 a 40 imagens de diferentes ângulos do material (Romano *et al.*, 2006), e a am-

pliação deste número garante o melhor desenvolvimento do modelo 3D. Porém, segundo Romano (inf. verbal), a partir de 20 fotos já é possível obter bons resultados na geração do modelo. As imagens obtidas são posteriormente tratadas no programa *3D SOM* (Creative Dimension Software, 2005).

A principal dificuldade do método de fotogrametria está na iluminação durante a aquisição das imagens. A presença de sombras no ou do objeto são reconhecidas pelo programa *3D SOM* como parte integrante do fóssil, implicando uma posterior remoção no programa, podendo causar erros na reprodução e demora. Uma solução para isto é o uso de sombrinhas refletoras, como as empregadas pelos estúdios fotográficos, ou o uso de um bom conjunto de flashes. O afastamento do fóssil da base de calibração também auxilia na redução da sombra, e a distância deve ser avaliada segundo o tipo de material a ser digitalizado. Com fósseis pequenos, pode variar entre 5 e 12 cm, enquanto peças maiores devem estar entre 12 a 20 cm de distância. Um excessivo afastamento, entretanto, impedirá a interpolação das imagens pelo programa.

Da mesma forma, cuidados devem ser tomados para evitar-se a queda do

material fóssil durante a tomada das fotos e, assim, deve ser garantida sua estabilidade sobre a base de calibração. Para tanto, mais uma vez sugere-se o uso de massa de modelar, cuja cor deve ser próxima da do fundo, o que apresenta melhores resultados.

A funcionalidade do método está diretamente atrelada à qualidade da câmera utilizada. Para a visualização de pequenos detalhes ou objetos (até 3 cm de comprimento), o ideal é a utilização de uma câmera fotográfica digital de alta resolução e com recursos de aproximação. Para Grillo (2004), no entanto, materiais com cerca de 30 cm de comprimento permitem boas imagens e um modelo 3D, mesmo quando se utilizam câmeras digitais mais simples.

Neste trabalho, aplicou-se o método indireto de fotogrametria em uma falange distal de *Carodnia vieirai*, com 3 cm de comprimento, 2,5 cm de altura e 1 cm de largura, e no úmero desta espécie, com 36 cm de comprimento (Figura 2). A formação do modelo 3D foi muito satisfatória para a falange, mas, no úmero, a grande diferença de tamanho entre o eixo maior (comprimento) e os demais não permitiu uma boa aquisição da superfície da epífise proximal.

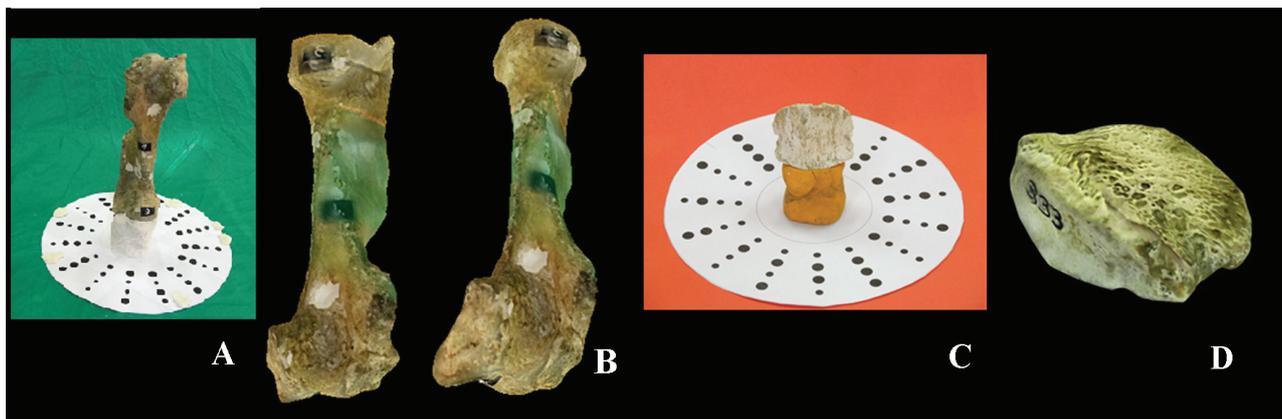


Figura 2. A. Úmero de *Carodnia vieirai* (DGM 333-M) montado sobre suporte para tomada de fotos de fotogrametria; B. modelo do Úmero a partir do modelamento 3D; C. montagem da falange ungual de *Carodnia vieirai* para a fotogrametria; D. resultado do modelamento da falange ungual.

Figure 2. A. Humerus of *Carodnia vieirai* (DGM 333-M) in position to taking the photogrametric images; B. after the 3D model; C. ungual phalanx of *Carodnia vieirai* in position for picture with fotogrametry method; D. final result of ungula phalanx after 3D modeling.

Fotogrametria sem base de calibração

No método de fotogrametria sem base de calibração a silhueta do objeto é manualmente formada através do programa modelador *Photomodeler PRO 5* (Eos Systems Inc., 2009). Para a formação do modelo 3D é necessário um mínimo de seis fotografias do material (com vistas dorsal, ventral, duas laterais, anterior e posterior), cujo contorno é traçado pelo programa.

Com isso, é possível ao *Photomodeler PRO 5* calcular as posições da câmera no momento das tomadas e, posteriormente, unir as linhas traçadas. Encontrando a posição certa e estando todas as linhas conectadas, o programa gera o modelo 3D.

A fotogrametria sem base de calibração, associada ao *Photomodeler PRO 5*, tem maior aplicabilidade em objetos mais planos e lisos, como, por exemplo, em ossos chatos, uma vez que superfícies irregulares geram maior dificuldade na tentativa de traçar o contorno e dificultam o reconhecimento da posição da câmera pelo programa.

O emprego desse método, embora vantajoso ao aceitar objetos de qualquer tamanho, é de execução trabalhosa e, até o momento, não foi aplicado no modelamento de fósseis.

Com o uso de outro programa, o *Photomodeler Scanner*, da mesma Eos Systems Inc. (2009), é ainda possível gerar um modelo 3D a partir de imagens obtidas com câmeras digitais normais ou analógicas. As fotos são digitalizadas em um *scanner* de mesa comum, colocando-se pontos de localização em torno do material, adquiridos junto com o programa, cuja função é a mesma da base de calibração dos outros métodos, ou seja, a de fornecer coordenadas ao programa sobre a posição da câmera em relação ao objeto. A aquisição das imagens deve ser realizada em diferentes ângulos do objeto (mínimo de seis fotos), para produzir superfícies densas e a malha necessária para a formação da imagem tridimensional.

Este método pode ser aplicado em diversas áreas, tendo já sido utilizado em

trabalhos de Arquitetura, Arqueologia e Engenharia Civil, mas é igualmente inédito em trabalhos paleontológicos. Entretanto, pode ser muito útil em estudos de icnofósseis e não tem limitações quanto ao tamanho das peças e serem digitalizadas.

Videogrametria com laser traço e webcam

Nesta técnica, é utilizada uma câmera de vídeo conectada a um computador, o traçado com laser e um padrão métrico como fundo de calibração (Figura 3). Enquanto o traço de laser varre manualmente a superfície do objeto, a *webcam* captura detalhes da superfície e os envia para o computador, onde é formada a malha correspondente à forma espacial do objeto. Para tanto, é necessário o conhecimento do modo de utilização do programa *David 3D* (David Laserscanner 3D, 2009), que é responsável pela fusão das malhas capturadas durante a varredura com o laser.

A resolução do modelo 3D, neste caso, estará atrelada ao tipo de computador utilizado, que deve estar equipado com uma placa de vídeo de alta capacidade e alta memória RAM, prevenindo a formação de ruídos na imagem.

A desvantagem do método reside em que o processo de tracejado com laser é realizado manualmente pelo operador, em movimentos lentos e repetitivos que exigem precisão e firmeza. Além disso, o procedimento deve ocorrer em um local com pouca iluminação, sendo que a presença de luz pode causar ruídos na malha, gerando estruturas irregulares capazes de confundir o modelador. Mesmo assim, é um método acessível, uma vez que o custo do programa *David 3D* é relativamente baixo.

Para o uso da videogrametria com objetos grandes, é necessária a construção de um fundo de calibração maior, que esteja de acordo com os parâmetros do programa. Com objetos menores, porém, o grau de precisão e qualidade da imagem é alto, desde que respeitados certos limites. Segundo o manual do programa *David 3D*, detalhes menores

que 0,4 mm são de difícil digitalização e provavelmente não serão visualizados no modelo 3D (David Laserscanner 3D, 2009).

O uso do *David 3D* é ainda inédito em Paleontologia por ser um produto relativamente novo. Para este trabalho, foi testado em uma escápula direita de *Carodnia vieirai*, com 25 cm de altura, e forneceu resultados regulares, já que apresentou pequenas alterações decorrentes do manuseio do laser. Esses ruídos, contudo, podem ser corrigidos com programas modeladores, como o *Geomagic Studio 10* (Geomagic Studio, 2010), ou ser minimizados, caso o tracejado com laser for acoplado a um suporte que garanta o movimento lento e contínuo sem trepidações.

Salienta-se que o maior custo computacional melhora a geração do modelo 3D, mas é importante uma boa malha de cobertura dos detalhes do objeto para os estudos de morfologia.

Videogrametria com projeção de padrões de luz branca

Esse é um método rápido e muito preciso, no qual é utilizado o *scanner Spatium FMM 3D* (Spatium FMM 3D Forma 4, 2010). Este equipamento compreende duas câmeras digitais e uma fonte de luz branca comum, conectados a um computador (Figura 4).

O programa que acompanha o equipamento triangula todos os pontos visíveis pelas duas câmeras, formando uma malha correspondente à forma espacial do objeto, e a união das malhas obtidas nas diferentes superfícies do material forma o objeto 3D.

Este método é excelente para digitalização de materiais pequenos e possui grande aplicação na Paleontologia, principalmente no estudo de dentes e ossículos, além de não apresentar qualquer restrição de uso em materiais de grande porte.

Suas maiores desvantagens são o elevado custo do equipamento, o tempo computacional necessário ao processamento e a necessidade de que os mate-

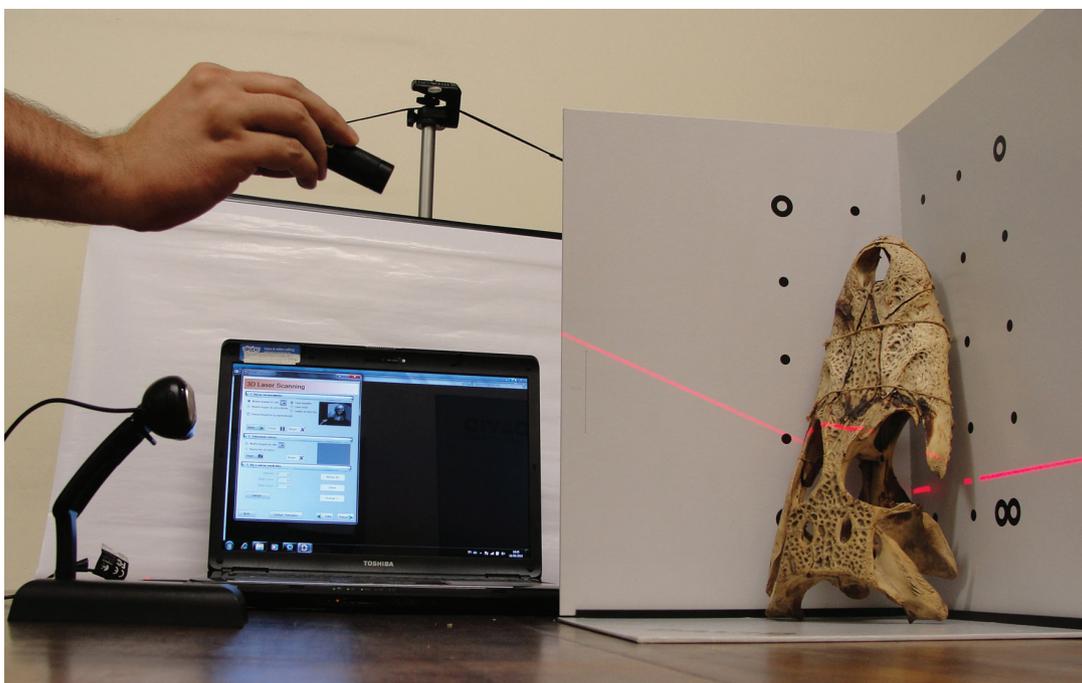


Figura 3. Método de aquisição de imagens através da videogrametria com laser traço e webcam.
Figure 3. Methodology to acquiring the videogrammetric images using laser and webcam.

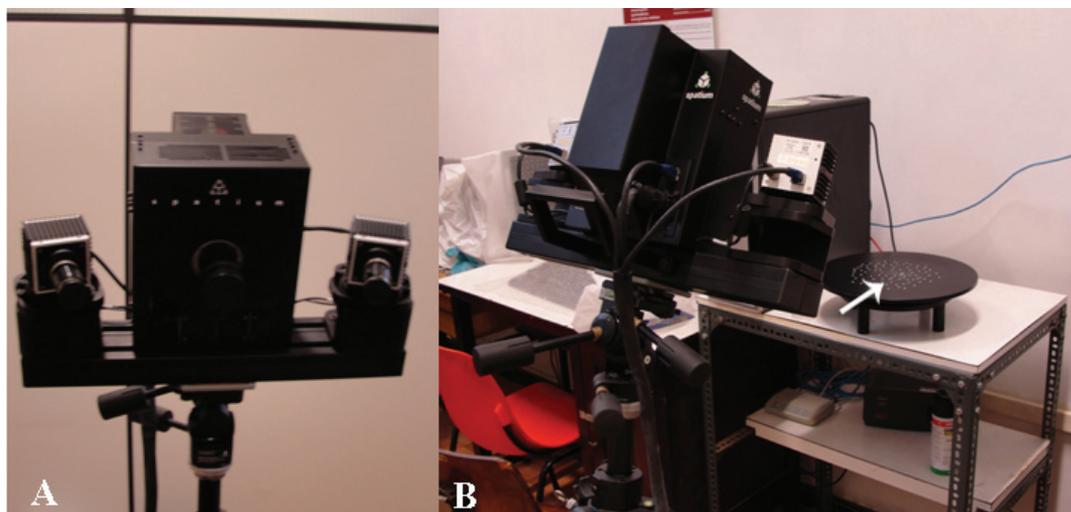


Figura 4. A. Equipamento digitalizador Spatium FMM 3D, do Laboratório 3D do Centro de Tecnologia da UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
B. Placa rotatória (seta) que acompanha o aparelho e computador.
Figure 4. A. Spatium FMM 3D scanner from 3D laboratory at Technological Center of Federal University of Rio de Janeiro, Brazil. B. Turntables and sorter (arrow) and computer devices that compound the Spatium 3D.

riais sejam totalmente opacos durante a captura da imagem. Este último aspecto pode ser sanado com o recobrimento do material fóssil com o revelador não aquoso SKD-S2 (em camada pouco espessa para não provocar irregularidades na peça), ou com cloreto de amônia, que, ao

ser aquecido, produz um gás que recobre o material fóssil e, posteriormente, pode ser facilmente removido, não causando danos ao material. Esse método foi aplicado na maxila de *Paulacoutoia protocenica*, cuja série dentária (P4-M3) possui 4 cm de comprimento, e no molar superior

de *Carodnia vieirai*, com 3 cm de largura, aproximadamente. Em ambos os casos, os resultados obtidos foram excelentes (Figura 5).

Dos métodos testados, foi o que apresentou a maior riqueza de detalhes para fósseis ou estruturas pequenas.

Laser scanner 3D

Faz-se necessário salientar, ainda, que existem vários tipos de aparelhos de *scanner* 3D. Os mais utilizados na Paleontologia no momento são o de mesa, o de mão e o tomógrafo, além do *scanner* de toque, que só recentemente tem sido empregado. A seguir, discute-se brevemente cada um desses suportes.

Scanner de mão

Por seu tamanho, este aparelho é o mais versátil e o de mais fácil manuseio (Figura 6). Um programa específico que o acompanha garante o modelo tridimensional. Com o *scanner* de mão, é possível gerar objetos 3D de fósseis grandes ou a partir de material em exposições, quando os ossos estão articulados, permitindo calcular a massa corporal e o centro de massa (Figura 7).

Para isso, é necessária a aquisição de imagens em diferentes ângulos e a fusão posterior em programa específico, resultando em modelos 3D com detalhes precisos e aceitável exatidão.

Há, no entanto, certa dificuldade na fusão das imagens e no trabalho com peças pequenas. Além disso, demanda equipamentos computacionais mais sofisticados, pois necessita de placas

de vídeo de qualidade e de boa capacidade de memória RAM, sob pena de distorcer as imagens e dificultar o trabalho posterior para melhorar sua qualidade.

Sua principal vantagem é, como citado anteriormente, possibilitar o estudo de materiais articulados e/ou de difícil manuseio, além do registro de fósseis preservados em posição de vida ou que registram a atividade de organismos, como os icnofósseis, preservando suas características tafonômicas (Gunga *et al.*, 2007; Medeiros *et al.*, 2007; Bates *et al.*, 2008).

Scanner de mesa

Formado por um aparelho com uma base giratória, o digitalizador de mesa varre o objeto com laser em várias posições, capturando imagens detalhadas de sua superfície e, com programa próprio, gera o modelo 3D através da fusão das imagens capturadas.

Como o anterior, demanda um alto custo computacional e não é apropriado para materiais de grande porte. Nesses casos, é necessário fracionar a digitalização do material, fazendo várias tomadas em diferentes posições. Não é igualmente eficaz para peças pequenas (menores que 6 cm), por não ser preciso

na captação de pequenas estruturas.

Suas vantagens são o fácil manuseio e a capacidade de fundir as imagens. Mostrou-se satisfatório no teste aqui realizado, que visava reconstituir hipoteticamente e em 3D o crânio de *Carodnia vieirai*, com resultados ricos em detalhes (Figura 8). Entretanto, o crânio modelado, com aproximadamente 46 cm de comprimento, está no limite de tamanho apropriado para o uso desse equipamento.

Tomografia computadorizada

Este é um método não destrutivo que, através do agrupamento de uma série de imagens bidimensionais de cortes sucessivos, transmite a informação volumétrica do material (Azevedo *et al.*, 2010). Os resultados obtidos possibilitam a reconstituição 3D da forma externa (Figura 9), a observação interna de um objeto, importante no estudo de ossos e outros esqueletos, e a visualização de fósseis, sem que sejam retirados da matriz rochosa, permitindo avaliar seus caracteres tafonômicos (Azevedo e Carvalho, 2009). Outro de seus benefícios é a segurança que fornece quanto a possíveis danos ao material fóssil.

Este método, utilizado normalmente com fins médicos, na detecção e diagnose

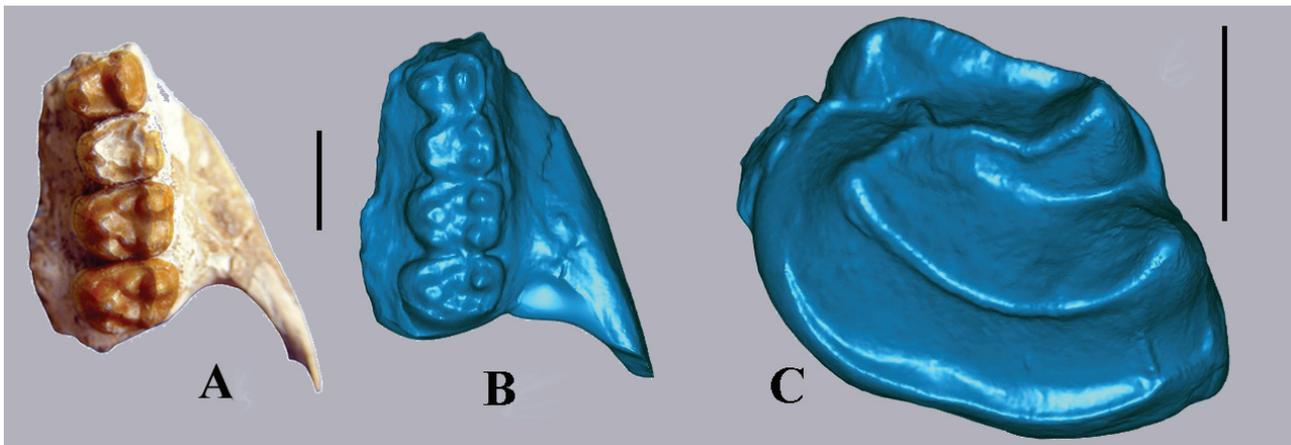


Figura 5. Modelos 3D gerados a partir de imagens adquiridas com o Spatium FMM 3D. **A.** original da maxila superior de *Paulacotoia protocenica* (DGM 968-M). **B.** modelo 3D da maxila; **C.** modelo 3D do molar superior de *Carodnia vieirai* (MCT 336-M). Escalas: 1cm.
Figure 5. Some 3D models generated by images obtained by Spatium FMM 3D scanner. **A.** original photo from the upper jaw of *Paulacotoia protocenica* (DGM 968-M). **B.** 3D model of the upper jaw; **C.** 3D model of the upper molar of *Carodnia vieirai* (MCT 336-M). Scale bars: 1 cm.



Figura 6. Digitalizador portátil 3D.

Figure 6. Portable laser 3D scanner.

Fonte: <http://sinhofer.wordpress.com/2009/09/17/zcorp-zscanner-600-portable-3d-laser-scanner>.

de inúmeras doenças, tem sido aplicado em Paleontologia, desde a década de 1980, com muito sucesso em termos de seus resultados (Azevedo e Carvalho, 2009; Mallison *et al.*, 2009). É útil, ainda, em qualquer ramo da ciência que tenha interesse em identificar estruturas interiorizadas e na avaliação de medidas lineares e de cálculos volumétricos (Lopes *et al.*, 2007).

Para sua aplicação em Paleontologia, difere apenas pelos pequenos ajustes necessários e relacionados à diferença de densidade dos fósseis. Os diversos cortes feitos pelo tomógrafo são reunidos para formação do objeto 3D através de programas como o *Mimics* (2010), o *3D Doctor* (2010) e o *Amira* (2010).

As maiores desvantagens deste método estão relacionadas ao seu preço e ao acesso ao tomógrafo, além do tempo computacional despendido para a geração do modelo 3D. Além disso, o tamanho dos materiais a serem estudados deve ser compatível à capacidade volumétrica do tomógrafo. Existem disponíveis tomógrafos para materiais grandes e também microtomógrafos, capazes de registrar ossículos, dentes, minerais, partes pequenas de vegetais fósseis, porosidades e microestruturas de distintas naturezas (Lasso *et al.*, 2008; Garwood *et al.*, 2009; Garwood e Sutton, 2010).

A microtomografia computadorizada tridimensional por transmissão de raios X (Micro-CT) possui os mesmos embasamentos da tomografia computadorizada, mas representa um avanço das técnicas de inspeção por raios X, sendo igualmente não invasiva e com resolução micrométrica (Lima *et al.*, 2007).

Scanner de toque

O *scanner* de toque é um tipo de escaneamento largamente utilizado nos últimos anos no campo da morfometria geométrica (Rodrigues e Santos, 2003; Nicholson e Harvati, 2006; Polly e MacLeod, 2008; Arbour e Snively, 2009; Milne *et al.*, 2009; Zollikofer *et al.*, 2009). Com o auxílio de braços digitalizadores, a digitalização é feita através do toque do *scanner* em pontos homólogos pré-determinados, denominados de *landmarks* (marcos anatômicos). Com a fusão dos pontos capturados é possível gerar modelos 3D razoavelmente acurados. Deste modo, quanto mais marcos anatômicos, mais precisa será a reconstrução virtual (Bookstein, 1991).

Os dados obtidos através do *scanner* de toque podem ser visualizados diretamente em programas geradores de imagem 3D, como o AutoCAD, ou

podem ser obtidos no *Word* ou *Excel*, da Microsoft. Quando salvos em formato de texto (extensão *.txt), os dados podem ser abertos e trabalhados em vários programas geradores de imagem tridimensional, como, por exemplo, *Solidworks* ou *Solidedge*. Os *scanners* de toque são facilmente transportados devido ao seu tamanho e peso e não necessitem de muita infraestrutura para se trabalhar (apenas uma superfície lisa e fixa e um computador no qual o *scanner* é ligado). Dessa forma, tornam-se equipamentos úteis pela precisão dos pontos marcados no espaço tridimensional, pela rapidez e por permitirem que sejam transportados a diversas coleções ou locais onde se encontram os fósseis, tomando-se o devido cuidado com a trepidação, uma vez que facilmente perdem sua calibragem.

Aponta-se, porém, como uma de suas restrições o tamanho dos objetos utilizados com esse equipamento. Em trabalho com o *MicroScribe 3DX*, Marcus *et al.* (2000) observaram que a menor distância entre os pontos tomados em um objeto deve ser de 0,25 mm. Ainda, existem limitações práticas para a digitalização de objetos maiores que 60 cm, o que limita o método. Outro fator importante é o preço elevado do aparelho e sua manutenção, que não é realizada no Brasil.

Tal metodologia quantitativa permite promover comparações morfológicas através de resultados numéricos, sendo muito útil na demonstração da variação existente entre os indivíduos através do estudo da morfometria geométrica (Bookstein, 1991; Zelditch *et al.*, 2004).

MANIPULAÇÃO DOS OBJETOS TRIDIMENSIONAIS OBTIDOS

Uma vez obtidas as imagens 3D dos objetos, programas modeladores podem ser utilizados para ajustar e melhorar o modelo tridimensional. É possível fazer animações, recriar tecidos orgânicos (Körting, 2007), consertar materiais danificados por rachaduras ou fraturas e reconstituir virtualmente o esqueleto do animal, revelando sua forma em vida (Grillo, 2007).

Os programas mais utilizados na modelagem dos objetos 3D são o *3D*

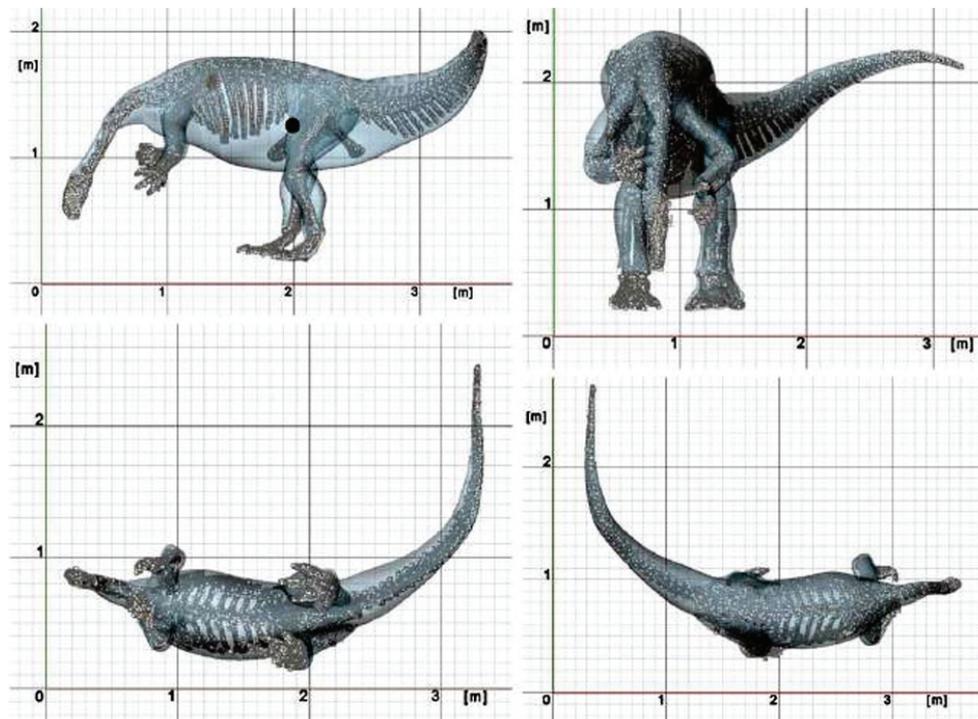


Figura 7. Modelo tridimensional de *Plateosaurus engelhardti* Meyer 1837, do Triássico Superior da Europa, com aproximadamente 5 m de comprimento, obtido a partir de imagens adquiridas com laser scanner 3D portátil (reproduzido a partir de Gunga *et al.*, 2007). Uma reconstituição virtual do crânio desta espécie está disponível no site do Museu Nacional (Grillo *et al.*, 2009).

Figure 7. A 3D model of *Plateosaurus engelhardti* Meyer 1837, from Late Triassic from Europe, with nearly 5 m long, acquired with a 3D laser scanner (from Gunga *et al.*, 2007). A virtual image of cranial surface of *P. engelhardti* is also available in the web site of National Museum, Brazil (Grillo *et al.*, 2009).

Studio Max e o *Maya* (da Autodesk), o *Rhinoceros* (da McNeel) e o *Geomagic Studio* (Dardon, 2009). O *Blender* (2010), por sua vez, é um programa gratuito e não necessita licença de uso.

Os programas CAD (*Computer Aided Design*) e CAE (*Computer Aided Engineering*) são utilizados para o cálculo de centro de massa, volume e massa corporal, sendo também muito usados em estudos de biomecânica. Além dos citados, outros programas CAD podem ser obtidos gratuitamente, possibilitando a realização deste tipo de análise, como o *Alibre Design*, o *CAD X11 Free* e o *BRL.CAD* (Barbosa e Liang-Lee, 2007).

EXEMPLOS DE APLICAÇÕES PRÉVIAS DA TÉCNICA 3D EM PALEONTOLOGIA

Como exposto anteriormente, o delimitamento tridimensional, em especial a tomografia computadorizada, vem sendo

aplicado no estudo dos fósseis desde a década de 1980, mas tornou-se mais amplamente empregada a partir da última década do século XX, especialmente no estudo de restos de vertebrados (Azevedo *et al.*, 2010) e de icnofósseis, sendo ainda raros os trabalhos com outros grupos fósseis.

Um dos trabalhos pioneiros utilizando a técnica 3D foi feito com mamíferos e possibilitou a reconstrução da estrutura interna do ouvido (Luo e Ketten, 1991). Rowe *et al.* (1999), Brochu (2000) e Maissey (2001) utilizaram essa técnica para a visualização tridimensional das cavidades vasculares e das estruturas nervosas, respectivamente, do crânio de um crocodilo, de um dinossauro e de um peixe.

Ainda salienta-se que uma importante aplicabilidade desta técnica é a possibilidade de detectar fraudes na preservação de espécimes fósseis. Rowe *et al.* (2001), com o auxílio de um tomógrafo, identificaram que o dinossauro *Archaeoraptor* era,

na realidade, a mescla de dois distintos espécimes.

Muitos estudiosos aplicaram a técnica 3D no estudo de pegadas fósseis (Medeiros *et al.*, 2007; Avanzini *et al.*, 2008; Petti *et al.*, 2008). Segundo estes autores, o método facilita o entendimento da disposição das pegadas no ambiente, da forma como caminhava seu produtor, da dinâmica e da velocidade do deslocamento, assim como de seu tamanho e massa. A técnica também permite reconhecer a forma de posicionamento do autopódio no solo e como ele deformava o sedimento durante o caminhar. De acordo com Medeiros *et al.* (2007), o scanner 3D traz ainda outras vantagens não permitidas nos métodos tradicionais de estudo, como a construção de seções sobre as pegadas, individualmente ou em conjunto, refazendo as trilhas.

Com o apoio de um scanner laser 3D, Gunga *et al.* (2007) encontraram a posição de equilíbrio e o centro de massa do

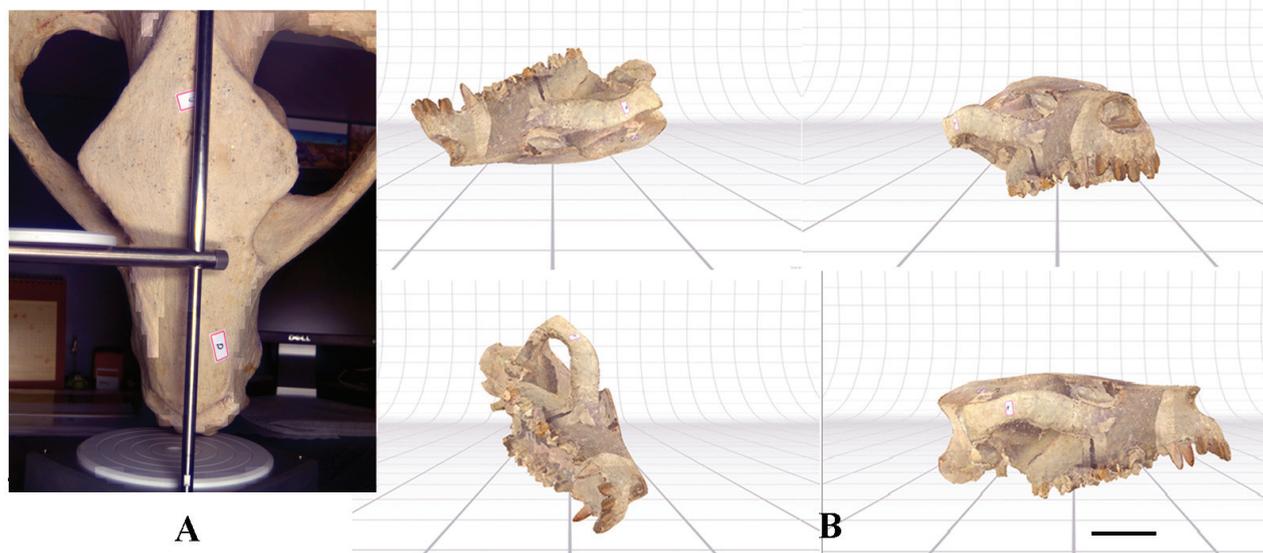


Figura 8. A. Crânio modelado e hipotético de *Carodnia vieirai*; B. modelos 3D do crânio, em diferentes vistas, formados a partir de imagens adquiridas com o *laser scanner* 3D de mesa *Next Engine* (Next Engine, 2008). Escala: 10 cm.

Figure 8. A. Hypothetical and shaped skull of *Carodnia vieirai*; B. distinct 3D models in different views, obtained from images taken with the table 3D laser scanner Next Engine. Scale bar: 10 cm.

saurópodo *Plateosaurus engelhardti* Meyer, 1837 do Triássico europeu (Figura 7), disponível virtualmente no Brasil em Grillo *et al.* (2009). Seguindo a mesma linha de trabalho, mas, baseando-se em marcos anatômicos, Hutchinsom *et al.* (2007) fizeram estudos de massa, centro de massa, volume e inércia no terópodo *Tyrannosaurus rex* Osborn 1905.

Além disso, a técnica 3D também é bastante útil no estudo dos dentes. Kohno e Uno (2002) identificaram o padrão de substituição dentária de *Desmostylus* (Mammalia) e sua respectiva fórmula. Evans e Fortelius (2008) aplicaram a técnica em várias espécies de mamíferos modernos e observaram as diferenças existentes no movimento da mandíbula durante a mastigação, relacionando as superfícies de contato durante a oclusão, observadas no modelo 3D, com as facetas de desgaste apresentadas pelos dentes.

Estudos biomecânicos são os mais comumente realizados com o apoio da técnica 3D. Com a geração de um modelo tridimensional, é possível analisar a posição das inserções musculares, dos feixes musculares e avaliar a proporção e a extensão da musculatura (Grillo, 2007). Com base em uma tomografia

computadorizada do crânio e da mandíbula de *Smilodon fatalis* Lund, 1941, Mchenry *et al.* (2007) analisaram a força da mordida comparada à de um leão atual. Esta comparação possibilitou visualizar a área de inserção dos feixes musculares no tigre de dentes de sabre e analisar o movimento e a força de sua mordida.

Com o auxílio da metodologia de fotogrametria com base de calibração e laser scanner 3D de mesa para aquisição das imagens e pelo uso do programa *3D Studio Max*, Grillo (2007) gerou um modelo 3D, reconstituindo a inserção da musculatura do dinossauro *Staurikosaurus pricei* Colbert 1970, permitindo visualizar a locomoção e estimar sua velocidade e postura.

Destaca-se, ainda, que trabalhos de morfometria geométrica tridimensional com dados adquiridos pelo *scanner* de toque são bastante comuns em estudos antropológicos que busquem dados sobre paleogeografia (Nicholson e Harvati, 2006) e modificações interespecíficas (Zollikofer *et al.*, 2009). Nos últimos anos, tal metodologia vem sendo cada vez mais utilizada em análises biomecânicas (Polly e MacLeod, 2008; Milne *et al.*, 2009; Arbour e Snively,

2009) e de paleobiologia (Rodrigues e Santos, 2003).

Dentre os poucos artigos sobre a utilização da técnica 3D no estudo de invertebrados, destaca-se o de Garwood *et al.* (2009), com duas espécies de aranhas extintas. O modelo mostrou, pela primeira vez, vários detalhes morfológicos não visualizados a olho nu.

Finalmente, é importante salientar o uso das modelagens tridimensionais em exposições paleontológicas virtuais (Romano *et al.*, 2006, 2007), possibilitando o acesso aos fósseis, a sua massa corpórea original, ao modo de locomoção e a seus hábitos, que tanto podem ser disponibilizados na rede como em atividades museológicas (Wolniewicz, 2009) e de divulgação da ciência (Rodrigues-Carvalho, 2009). Para facilitar a comunicação científica e o acesso às imagens 3D, convém que os modelos tridimensionais sejam exportados para o formato *.VRML ou *.SWF (arquivos flash, uma opção mais acessível para a maioria dos usuários, mas com menos vantagens que a *.VRML), que possibilitam a observação em ambientes virtuais. Para hospedagem de um objeto 3D, portanto, necessita-se apenas de um *plug-in*, amplamente disponível na web (MacLeod, 2001).



Figura 9. *Carodnia vieirai*, modelos 3D dos ramos mandibulares (DGM 334-M) e, no centro, de parte da maxila (DGM 333-M), obtidos através de imagens de tomografia. Escala: 10 cm.

Figure 9. *Carodnia vieirai*, 3D models from right and left dentary (DGM 334-M) and, in the central part of the photo, from part of the maxilla (DGM 333-M), obtained from CT scan images. Scale bar: 10 cm.

A técnica de modelagem 3D possibilita ainda ao pesquisador reproduzir o fóssil através de prototipagem, em uma impressora estereolitográfica (prototipador), e a obtenção de uma réplica do fóssil sem a necessidade de modelagem, que pode causar danos a fósseis mais delicados (Azevedo e Carvalho, 2009). Fósseis de grandes dimensões podem ainda ser reconstruídos, com riqueza de detalhes, em escalas menores (Medeiros *et al.*, 2007). A prototipagem também possibilita o estudo direto de partes internas do esqueleto que só poderiam ser vistas no fóssil através de métodos destrutivos, ou observadas em ambiente virtual.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação de técnicas 3D, apesar de relativamente recente e ainda pouco utilizada, contribui com várias frentes de pesquisa paleontológica, possibilitando o estudo em detalhe e o manuseio virtual de modelos tridimensionais de fósseis muito grandes e/ou muito raros. Ao possibilitar o estudo dos fósseis sem a necessidade de seu manuseio constante, facilita sobremaneira a comparação de espécimes depositados em instituições museológicas. Dessa forma, com a técnica 3D, é possível reconstruir fósseis danificados, estimar sua massa e realizar estudos biomecânicos, morfológicos ou

que utilizem comparação entre diversos fósseis, além de promover sua divulgação científica a vários tipos de público.

Embora seja uma boa técnica de obtenção de imagens, a técnica 3D pode oferecer, contudo, alguma alteração nos valores biométricos e, portanto, deve ser utilizada com cautela em estudos que necessitem de dados mais precisos. Este problema pode ser reduzido a partir de comparações detalhadas entre o fóssil e o modelo 3D gerado. Assim, caso seja constatada alguma alteração, deve-se buscar a causa do problema entre a qualidade da iluminação e a capacidade do computador ou do software utilizado.

Dentre os métodos aqui apresentados, os indiretos demonstraram ser os mais úteis no estudo de restos fósseis, dada a gama de opções que oferecem. Entre eles, a fotogrametria com base de calibração e a videogrametria com laser traço e *webcam* são os que apresentam melhor custo/benefício. A fotogrametria ainda oferece como vantagem seu baixo custo, embora seja de processamento mais demorado que aquele da videogrametria, o qual, por sua vez, perde em exatidão, pela aquisição manual dos dados. Entretanto, a última mostra-se a técnica mais adequada para espécimes a técnica mais adequada para espécimes com superfícies muito irregulares, pois permite capturar mais detalhes.

Entre os programas de geração das imagens, utilizando-se ambas as metodologias, o *3D SOM* foi o que conseguiu capturar melhor a textura original do material fotografado. Esta constatação permite propor que o uso de métodos diretos deve ser reservado apenas a materiais que exijam dados de volume, massa e centro de massa da espécie.

Para fósseis de tamanhos pequenos, muitos dos equipamentos disponíveis apresentam restrições de uso. Para estes, a videogrametria com projeção de padrões de luz branca é a opção que demonstrou ser mais apropriada nos experimentos aqui realizados, captando melhor os detalhes do material digitalizado, em que pese seu custo elevado. Para este fim, equipamentos digitalizadores 3D voltados para fins odontológicos são também indicados.

Entre as principais dificuldades para o trabalho com a modelagem 3D está a aquisição da licença para utilização dos programas modeladores, em parte suprida por alguns bons programas gratuitos, como o *Blender*, e o alto custo operacional, devido à necessidade de utilização de grande quantidade de memória e de placas de vídeo de alta capacidade. Nesse momento, o sistema operacional mais apropriado para a aplicação da técnica 3D é o Windows 7®. É importante salientar que a maior parte do processo de modelamento 3D está atrelada ao tipo de câmera utilizada e ao tipo de equipamento computacional, que devem ser de boa resolução e memória RAM. Quanto maior o custo computacional, melhores e mais detalhados serão os modelos 3D gerados, um aspecto que pode ser fundamental nos estudos morfológicos.

Os experimentos feitos, visando testar as metodologias de modelamento tridimensional disponíveis e as aplicações da técnica 3D, demonstram sua enorme utilidade de aplicação nas distintas áreas da paleontologia e para a documentação e produção de materiais didáticos, auxiliando no ensino prático e promovendo o aprendizado. Seu uso, a partir dos últimos anos, tem comprovado tais aplicações. Na medida em que forem resolvidos problemas de acessibilidade e melhores ferramentas computacionais apareçam, certamente constituirá ferramenta indispensável aos estudos e pesquisas paleontológicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Dr. Tsuneharu Ogasawara (Laboratório 3D do Centro de Tecnologia da UFRJ), pelo uso do Spatium FMM 3D *scanner* e de programas de modelamento 3D, a Me. Edilberto Sanches Garcia Júnior, do mesmo laboratório, pela ajuda na digitalização; ao Dr. Sérgio Alex K. de Azevedo (Museu Nacional/UFRJ), por disponibilizar o *scanner* de mesa *Next Engine*; ao Dr. Pedro Romano (UFBA – ICADS) e ao Me. Orlando N. Grillo (PPG Zoologia, Museu Nacional-UFRJ), pelo auxílio nos distintos métodos e pro-

gramas modeladores. A Caroline Rehem de Brito (UFRJ), pela ajuda na revisão do manuscrito; ao Dr. Paulo Yoskev (Grupo de Modelagem Molecular de Sistemas Biológicos, LNCC/MCT), pelas sugestões e ideias; e ao DNPM, pelo empréstimo dos fósseis. Agradecemos, ainda, a Victor D.G. da Silva, pela revisão de língua inglesa e, especialmente, às sugestões e críticas dos revisores da G&EA, que muito contribuíram para o aprimoramento dos resultados. U. Dardon, C.T.S. Abranches e L.P. Bergqvist agradecem o apoio do CNPq, na forma, respectivamente, da bolsa de Iniciação Científica, Doutorado e Pesquisador.

REFERÊNCIAS

- ALIBRE DESIGN. 2010. Alibre Inc., Campbell Creek Texas. Disponível em: <http://www.alibre.com>, acesso em: 15/10/2010.
- AMIRA. 2010. *Multifaceted software platform for visualizing, manipulating, and understanding Life Science and bio-medical data coming from all types of sources*. Visage Imaging GmbH Co., North America, Central & South America. Disponível em: <http://www.amira.com>, acesso em: 21/10/2010.
- ARBOUR, V.M.; SNIVELY, E. 2009. Finite element analyses of ankylosaurid dinosaur tail club impacts. *The Anatomical Record*, **292**:1412-1426. <http://dx.doi.org/10.1002/ar.20987>
- AVANZINI, M.; FRANCESCHI, M.; PETTI, F.M.; GIRARDI, S.; FERRETTI, P.; TOMASONI, R. 2008. New Early Jurassic (Hettangian-Sinemurian) sauropodomorph tracks from the Trento carbonate Platform (Southern Alps, Northern Italy). *Studi Tridentini Scienze Naturali, Acta Geologica*, **83**:317-322
- AZEVEDO, S.A.K.; CARVALHO, L.B. 2009. O uso da tomografia computadorizada no estudo de vertebrados fósseis. In: H. WERNER JR.; J. LOPES (org.), *Tecnologia 3D Technologies: Paleontologia, Arqueologia e Fetologia*. Rio de Janeiro, Livraria e Editora Revinter, p. 1-32.
- AZEVEDO, S.A.K.; SILVA, J.P.; SILVA, V.G. 1994. O uso da tomografia computadorizada na Paleontologia de Vertebrados. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **66**(2):254.
- AZEVEDO, S.A.K.; CARVALHO, L.B.; SANTOS, D.D. 2010. Metodologias digitais aplicadas no estudo de vertebrados. In: I.S. CARVALHO, *Paleontologia*. 3ª ed., Rio de Janeiro, Editora Interciências, vol. 1, p. 445-450.
- BARBOSA, C.C.; LIANG-YEE, C. 2007. Uso de CAD freeware no ensino de engenharia. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GRAPHICS ENGINEERING FOR ARTS DESIGN, 7, UFPR, Curitiba, *Anais*, p. 1-10.
- BATES, K.T.; MANNING, P.L.; VILA, B.; HODGETTS, D. 2008. Three-dimensional modelling and analysis of dinosaur trackways. *Palaeontology*, **51**(4):999-1010. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-4983.2008.00789.x>
- BLENDER 2.54 Beta. 2010. *Sintel Open 3D movie project*. Blender Foundation, Amsterdam Blender Institute. Disponível em: <http://www.blender.org>, acesso em: 20/10/2010.
- BOOKSTEIN, F.L. 1991. *Morphometric tools for landmark data: geometry and biology*. New York, Cambridge University Press, 435 p.
- BRANCAGLION JR., A. 2009. O estudo científico das múmias egípcias. In: H. WERNER JR.; J. LOPES (org.), *Tecnologia 3D Technologies: Paleontologia, Arqueologia e Fetologia*. Rio de Janeiro, Livraria e Editora Revinter, p. 49-75.
- BRL-CAD. 2010. *Open source solid modeling*. Disponível em: <http://brlcad.org/d/download>, acesso em: 15/10/2010.
- BROCHU, C.A. 2000. A digitally-rendered endocast for *Tyrannosaurus rex*. *Journal of Vertebrate Paleontology*, **20**(1):1-6. [http://dx.doi.org/10.1671/0272-4634\(2000\)020\[0001:ADREFT\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1671/0272-4634(2000)020[0001:ADREFT]2.0.CO;2)
- CAD X11® FREE. 2010. 2D drafting and basic wireframe and surface modeling. GrayTech Software, Inc. Wheaton, Illinois, USA. Disponível em: <http://www.graytechsoftware.com>, acesso em: 21/10/2010.
- CREATIVE DIMENSION SOFTWARE. 2005. *3D Software Object Modeller Pro (3D SOM)*. Canon Research Centre Europe (CRE) Ltd, Canon Inc., Guildford, UK. Disponível em: <http://www.3dsom.com/>, acesso em: 23/10/2010.
- CASSAB, R.C.T. 2004. Objetivos e princípios. In: I.S. CARVALHO (ed.), *Paleontologia*. Rio de Janeiro, Interciência, vol. 1, p. 3-11.
- DARDON, U. 2009. A metodologia 3D e sua aplicação na Paleontologia: In: JORNADA GIULIO MASSARANI DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, ARTÍSTICA E CULTURAL, 31, Rio de Janeiro, UFRJ, Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, *Anais*, p. 469.
- DAMASCENO, E.F.; DIAS JUNIOR, J.B.; LOPES, L.F.B. 2009. Aplicação da técnica de redesenho de ambientes 3D por meio de engenharia semiótica. In: WORKSHOP DE REALIDADE AUMENTADA (WRVA), 6, Santos, Universidade Santa Cecília. Disponível em: <http://sites.unisant.br/wrva/st%5C62274.pdf>, acesso em: 15/10/2010.
- DAVID LASERSCANNER 3D. 2009. Manual de utilização do David Laser Scanner 3D. DAVID Vision Systems GmbH, Koblenz, Germany. Disponível em: http://www.david-laserscanner.com/wiki/user_manual/frequently_asked_questions, acesso em: 22/10/2010.
- 3D DOCTOR. 2010. *Vector-based 3D imaging, modeling and measurement software*. Able Software Corp. Disponível em: <http://www.ablesw.com/3d-doctor>, acesso em: 22/10/2010.

- EOS SYSTEMS INC. 2009. *Photomodeler scanner*, Measuring e Modeling the Real Word. Disponível em: <http://www.photomodeler.com/index.htm>, acesso em: 21/01/2010.
- EVANS, A.R.; FORTELIUS, M. 2008. Three-dimensional reconstruction of tooth relationships during carnivoran chewing. *Palaentologia Electronica*, **11**(2):1-11.
- FIGGINS, S. 2001. Graphics in computational paleontology. *IEEE Computer Graphics and Applications*, **1**:272-716.
- FOGGIATTO J.A. 2006. Uso de prototipagem rápida na área médico-odontológico. NUFER-DAMEC/CITEC, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTF-PR). Disponível em: <http://www.nufer.ctec.ct.utfpr.edu.br/O%20Uso%20da%20Prototipagem%20R%20E%20na%20%20C%20rea%20M%20E%20dico5.pdf>, acesso em: 15/10/2010.
- GARWOOD, R.; SUTTON, M. 2010. X-ray micro-tomography of Carboniferous stem-Dictyoptera: new insights into early insects. *Biological Letters*, **6**:699-702. <http://dx.doi.org/10.1098/rsbl.2010.0199>
- GARWOOD, R.; DUNLOP, J. A.; SUTTON, M.A. 2009. High-fidelity X-ray-micro-tomography reconstruction of siderite-hosted Carboniferous arachnids. *Biology Letters*, **5**:841-844. <http://dx.doi.org/10.1098/rsbl.2009.0464>
- GEOMAGIC STUDIO. 2010. *Studio 12 reverse engineering software*. Geomagic Labs Inc.. Disponível em: http://www.geomagic.com/de/labs/dicom/di_industrial.php, acesso em: 22/10/2010.
- GRILLO, O.N. 2004. *Reconstrução do esqueleto de Staurikosaurus pricei (Dinosauria, Theropoda): uso de scanner laser 3D e modelagem virtual tridimensional para reconstruir vertebrados fosseis*. Rio de Janeiro, Monografia de Bacharelado, Curso de Biologia, UFRJ, 64 p.
- GRILLO, O.N. 2007. *Miologia e biomecânica do membro posterior de Staurikosaurus pricei*. Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, UFRJ, 253 p.
- GRILLO, O.; MONNERAT, M.; ROMANO, P. 2009. *Dinosvirtuais, Exposição de Paleovertebrados*. Museu Nacional, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.latec.ufrj.br/dinosvirtuais/catalogo/index.html>, acesso em: 07/10/2010.
- GUNGA, H.C.; SUTHA, T.; BELLMANN, A.; FRIEDICH, A.; SCHWANEBDCK, T.; STOINSKI, S.; TRIPEPL, T.; KIRSH, K.; HELLWICH, O. 2007. Body mass estimations for *Plateosaurus engelhardti* using laser scanning and 3D reconstruction methods. *Naturwissenschaften*, **94**:623-630. <http://dx.doi.org/10.1007/s00114-007-0234-2>
- HAYASAKI, C.L.; CAPELLO SOUSA, E.A. 2006. Modelagem de estruturas ósseas e próteses através do Método dos Elementos Finitos. In: SIMPÓSIO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO- SIMPEP, 13, Bauru, *Anais*, p. 1-12.
- HENDERSON, D.M. 1999. Estimating the masses and centers of mass of extinct animals by 3-D mathematical slicing. *Paleontological Society*, **25**(1):88-106.
- HUTCHINSON, J.R.; NG-THOW-HING, V.; ANDERSON, F.C. 2007. A 3D interactive method for estimating body segmental parameters in animals: application to the turning and running performance of *Tyrannosaurus rex*. *Journal of Theoretical Biology*, **246**:660-680. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtbi.2007.01.023>
- KOHNO, N.; UNO, H. 2002. Dental formula and tooth replacement pattern in *Desmostylus* as revealed by high-resolution X-Ray CT. *Journal of Vertebrate Paleontology*, **22**(3):75A.
- KÖRTING, T.S. 2007. *Animador tridimensional de faces*. Rio Grande, Monografia, FURG, 74 p.
- LASSO, P.R.O.; VAZ C.M.P.; NAIME, J. de M. 2008. *Recomendações para utilização do microtomógrafo de raios-X Sky Scan 1172 em ciências agrárias e biológicas*. São Carlos, Embrapa Instrumentação Agropecuária, Documentos 37, 22 p.
- LIMA, I.; APPOLONI, C.; OLIVEIRA, L.; LOPES, R.T. 2007. Caracterização de materiais cerâmicos através da microtomografia computadorizada 3D. *Revista Brasileira de Arqueometria, Restauração e Conservação*, **1**(2):22-27.
- LOPES, P.M.L.; PERRELA, A.; MOREIRA, C.M.; NETO, J.R.; CAVALCANTE, M.G.P. 2007. Aplicação de medidas cefalométricas em 3D-TC. *Dental Press Ortodon Ortop Facial*, **12**(4):99-106.
- LUO, Z.-X.; KETTEN, D.R. 1991. CT scanning and computerized reconstructions of the inner ear structure of multituberculate mammals. *Journal of Vertebrate Paleontology*, **11**(1):220-228. <http://dx.doi.org/10.1080/02724634.1991.10011389>
- MACLEOD, N. 2002. Paleonet: paleontology, publication and community in the digital age. *Computers & Geosciences*, **28**:1161-1166. [http://dx.doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00035-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00035-3)
- MAISEY, J. 2001. CT-Scan reveals new cranial features in Devonian Chondrichthyan "Cladodus" wilidgenensis. *Journal of Vertebrate Paleontology*, **21**(4):807-810. [http://dx.doi.org/10.1671/0272-4634\(2001\)021\[0807:CSRNCJ\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1671/0272-4634(2001)021[0807:CSRNCJ]2.0.CO;2)
- MALLISON, H.; HOHLOCH, A.; PFRETZSCHNER, H. 2009. Mechanical Digitizing for Paleontology - New and Improved Techniques. *Palaentologia Electronica*, **12**(2):1-41.
- MARCUS, L.F.; HINGST-ZAHER, E.; ZAHER, H. 2000. Application of landmark morphometrics to skulls representing the orders of living mammals. *Hystrix*, **11**:27-48.
- MIMICS. 2010. *Mimics, bridge the gap between 2D image data & 3D engineering applications*. Materialise© NV 2010. Disponível em: <http://www.materialise.com/mimics>, acesso em: 21/10/2010.
- MCHENRY, C.R.; WROE S.; CLAUSEN P.D.; MORENO K.; CUNNINGHAM, E. 2007. Supermodeled sabercat, predatory behavior in *Smilodon fatalis* revealed by high-resolution 3D computer simulation. *PNAS*, **104**(41):16010-16015. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0706086104>
- MEDEIROS, A.M.; FAVERA, J.C.D.; REIS, M.A.F.; SILVA, T.L.V.; OLIVEIRA, E.B.; BIASSUSI, R.A.; SILVEIRA, R.G. 2007. O laser scanner e a Paleontologia em 3D. *Anuário do Instituto de Geociências*, **30**(1):94-100.
- MILKHAJ, E.M.; BETHEL, J.S.; McGLONE, J.C. 2001. *Introduction to modern photogrammetry*. New York, John Wiley & Sons Inc., 479 p.
- MILNE, N.; VIZCAÍNO, S.F.; FERNICOLA, J.C. 2009. 3D geometric morphometric analysis of digging ability in the extant and fossil cingulate humerus. *Journal of Zoology*, **278**(1):48-56. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-7998.2008.00548.x>
- NEXT ENGINE. 2008. *NextEngine Desktop 3D Scanner*. New Technology CAD/CAM Limited and Solid Work, UK. Disponível em: <http://www.ntccadcam.co.uk/NextEngine-Desktop-3D-Scanner.htm>, acesso em: 21/10/2010.
- NICHOLSON, E.; HARVATI, K. 2006. Quantitative analysis of human mandibular shape using three-dimensional geometric morphometrics. *American Journal of Anthropology*, **131**: 368-383. <http://dx.doi.org/10.1002/ajpa.20425>
- PETTI, F.M.; AVANZINI, M.; BELVEDERE, M.; DE GASPERI, M.; FERRETTI, P.; GIRARDI, S.; REMONDINO, F.; TOMASONI, R. 2008. Digital 3D modelling of dinosaur footprints by photogrammetry and laser scanning techniques: evaluation of the integrated approach at the Coste dell' Anglone tracksite (Lower Jurassic, Southern Alps, Northern Italy). *Studi Tridentini Scienze Naturali, Acta Geologica*, **83**:303-315.
- POLLY, P.D.; MACLEOD, N. 2008. Locomotion in fossil Carnivora: an application of eigensurface analysis for morphometric comparison of 3D surface. *Palaentologia Electronica*, **11**(2):10-13.
- REHEM, C.B.; SOBRAL, G.B.; ROMANO, P.S.R.; GRILLO, O.N.; CARVALHO, L.B.; HENRIQUES, D.D.R.; AZEVEDO, S.A.K. 2007. Inventário de exemplares das coleções de paleovertebrados do Museu Nacional/UFRJ e do Museu de Ciências da Terra/DNPM submetidos às técnicas de análise digital, Rio de Janeiro. *Anuário do Instituto de Geociências*, **30**:216-216.
- REMONDINO, F.; RIZZI, A.; GIRARDI, S.; PETTI, F.M.; AVANZINI, M. 2010. 3D Ichnology-recovering digital 3D models of dinosaur footprints. *The Photogrammetric Record*, **25**(131):266-282. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1477-9730.2010.00587.x>
- REZENDE, W.S. 2006. *Medida por medida, da representação à simulação, do analógico ao digital*. Belo Horizonte, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 146 p.
- RODRIGUES-CARVALHO, C. 2009. Os ossos não são o limite - Técnicas não-invasivas e remanescentes esqueléticas de populações pretéritas. In: H. WERNER

- JR.; J. LOPES (org.), *Tecnologia 3D Technologies: Paleontologia, Arqueologia e Fetologia*. Rio de Janeiro, Livraria e Editora Revinter, p. 33-48.
- RODRIGUES, L.A.; SANTOS, V.F. 2003. Morfometria geométrica aplicada em Paleobiologia de dinossauros. In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOLOGIA, 6, Lisboa, Ciências da Terra, n. V, CD-ROM, p. A141-A145.
- ROMANO, P.S.R.; MONNERAT M.C.; HAGUENAUER, C.; CUNHA, G.G.; AZEVEDO, S.A.K.; KELLNER, A.W.A. 2006. Usage of image-based 3D modeling process for reconstruction of Upper Cretaceous Brazilian sidenecked turtle *Bauruemys elegans* Suárez, 1969 (Pleurodira: Podocnemididae): a preliminary study. In: ANNUAL SVP MEETING, 66, Denver 2006. *Journal of Vertebrate Paleontology*, **26**(3, supl.):116A.
- ROMANO, P.S.R.; MONNERAT, M.C.; GRILLO, O.N.; CABRAL, U.G.; HENRIQUES, D.D.R.; HAGUENAUER, C.; CUNHA, G.G.; AZEVEDO, S.A.K. 2007. Use of virtual reality to construct a web based digital collection and exhibition of vertebrate paleontology. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA, 20, SBP, Búzios. *Anais*, p. 301.
- ROWE, T.; BROCHU, C.A.; KISHI, K. 1999. Cranial morphology of Alligator mississippiensis and phylogeny of Alligatoroidea. *Journal of Vertebrate Paleontology*, **19**(2, Supplement):100.
- ROWE, T.; KETCHAM, R.A.; DENIXON, C.; COLBERT, M.; XU, X.; CURRIE, P.J. 2001. Forensic palaeontology: The Archaeoraptor forgery. *Nature*, **410**:539-540. <http://dx.doi.org/10.1038/35069145>
- SELLERS, W.I.; MANNING, P.L.; LYSON, T.; STEVENS, K.; MARGETTS, L. 2009. Virtual palaeontology: gait reconstruction of extinct vertebrates using high performance computing. *Palaeontologia Electronica*, **12**(3):11-26.
- SMITH, N.E.; STRAIT, S.G. 2008. PaleoView 3D: from specimen to online digital model. *Palaeontologia Electronica*, **11**(2):11-17.
- SPATIUM FMM 3D FORMA 4. 2008. Digitalizador 3D de medição sem contato. Spatium Tecnologia 3D Ltda, Campinas, São Paulo. Disponível em: <http://www.spatium3d.com/spatium>, acesso em: 22/10/2010.
- SUTTON, M. D.; BRIGGS, D.E.G.; SIVETER, D. J. 2001. Methodologies for the visualization and reconstruction of three-dimensional fossils from the Silurian Herefordshire Lagerstätte. *Palaeontologia Electronica*, **4**(1):1-17.
- VEREDIANA, S.; HERMOSILLA, L. 2005. Realidade virtual na medicina. *Revista Científica Eletrônica de Sistemas de Informação*, **2**:1807-1872.
- WILHITE, R. 2003. Digitalizing large fossil skeletal elements for three-dimensional applications. *Palaeontologia Electronica*, **5**(1):1-10.
- WOLNIEWICZ, P. 2009. Easily-accessible digital palaeontological databases – A new perspective for the storage of palaeontological information. *Geologos*, **15**(3-4):181-188. <http://dx.doi.org/10.2478/v10118-009-0002-1>
- ZELDITCH, M.L.; SWIDERSKI, D.L.; SHEETS, H.D.; FINK, W.L. 2004. *Geometrics morphometrics for biologists: a primer*. New York, Elsevier, 443 p.
- ZOLLIKOFER, C.P.E.; LEÓN, M.S.P.; CHAIMANEE, Y.; LEBRUN, R.; TAFFOREAU, P.; KHANSUBHAAND, S.; JAEGER, J.J. 2009. The face of *Siamopithecus*: new geometric-morphometric evidence for its anthropoid status. *The Anatomical Record*, **292**:1734-1744. <http://dx.doi.org/10.1002/ar.20998>

Submetido em: 20/05/2010

Aceito em: 24/10/2010