



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO - UNIRIO



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS -
BIODIVERSIDADE NEOTROPICAL (PPGBIO)

MARIA LUANA VIANA DE ARAÚJO

Reconhecimento do dimorfismo sexual de *Notiomastodon platensis* (Mammalia,
Proboscidea) do Quaternário da América do Sul

RIO DE JANEIRO

2026



MARIA LUANA VIANA DE ARAÚJO

Reconhecimento do dimorfismo sexual de *Notiomastodon platensis* (Mammalia,
Proboscidea) do Quaternário da América do Sul

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Ciências Biológicas
(Biodiversidade Neotropical) da Universidade
Federal do Estado do Rio de Janeiro (UNIRIO)
como requisito para a obtenção do grau de
Mestre em Ciências Biológicas.

Orientadora: Dr^a. Dimila Mothé

Co-orientador: Dr. Felipe Augusto Correia Monteiro

Rio de Janeiro - RJ

2026

Catálogo informatizada pelo(a) autor(a)

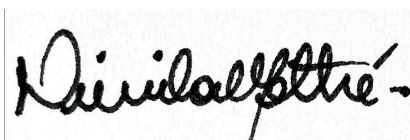
- A659 Araújo, Maria Luana Viana de
Reconhecimento do dimorfismo sexual de *Notiomastodon platensis* (Mammalia, Proboscidea) do Quaternário da América do Sul / Maria Luana Viana de Araújo. -- Rio de Janeiro : UNIRIO, 2026.
52
- Orientadora: Dimila Mothé Cordeiro dos Santos .
Coorientador: Felipe Augusto Correia Monteiro.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas, 2026.
1. Morfometria. 2. Megafauna . 3. Paleobiologia . I. Cordeiro dos Santos , Dimila Mothé, orient. II. Correia Monteiro, Felipe Augusto, coorient. III. Título.

MARIA LUANA VIANA DE ARAÚJO

Reconhecimento do dimorfismo sexual de *Notiomastodon platensis* (Mammalia,
Proboscidea) do Quaternário da América do Sul

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas
(Biodiversidade Neotropical) da Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro
(UNIRIO), no dia 31 de agosto de 2026, como requisito para a obtenção do grau de Mestre
em Ciências Biológicas.

Banca Examinadora



Prof^a. Dr^a. Dimila Mothé (Orientadora)

Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro - UNIRIO

Documento assinado digitalmente
 **RAFAEL DA ROCHA FORTES**
Data: 03/09/2026 18:40:19-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Rafael da Rocha Fortes (Avaliador Interno)

Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro - UNIRIO

Documento assinado digitalmente
 **RODRIGO PARISI DUTRA**
Data: 03/09/2026 11:21:42-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Rodrigo Parisi Dutra (Avaliador Externo)

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC Minas

Dedico este trabalho àqueles que acreditaram em
mim, mesmo quando eu duvidei.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pela fé e pela luz que guiaram cada passo desta jornada.

Expresso minha sincera gratidão ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas (Biodiversidade Neotropical) da Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (PPGBIO/UNIRIO) pela oportunidade de realizar este mestrado e pela formação acadêmica e científica proporcionada ao longo dessa trajetória.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), agradeço pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de estudos, sem o qual esta pesquisa não teria sido possível.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Dimila Mothé, expresso minha mais profunda gratidão por toda a confiança depositada em mim ao longo desta caminhada. Agradeço por sua competência, dedicação e força diante das adversidades que enfrentamos durante o desenvolvimento deste trabalho. O processo não foi fácil, mas, em todos os momentos, você esteve ao meu lado, enfrentando os desafios como uma verdadeira equipe, incentivando-me, acreditando no meu potencial e comemorando cada conquista comigo. Sua orientação foi muito além da esfera acadêmica, tornando esta trajetória mais leve, enriquecedora e possível. Levarei comigo seus ensinamentos, seu apoio e sua generosidade com imensa gratidão.

Ao meu coorientador, Dr. Felipe Monteiro, expresso minha sincera gratidão por todo o apoio e confiança ao longo desta trajetória. Agradeço por ter segurado minha mão e contribuído para abrir e fortalecer meu caminho acadêmico.

Ao meu marido, Alexandre, minha fortaleza silenciosa e meu porto seguro nos dias de tempestade acadêmica. Seu amor, apoio e companheirismo foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Esta vitória é tão sua quanto minha.

À minha filha, Maria Cecília. Foi por você e com você que encontrei forças para seguir em frente, mesmo nos dias mais difíceis. Você me impulsiona diariamente a ser uma pessoa melhor, uma mãe melhor e uma pesquisadora melhor. Que um dia você compreenda que cada página desta dissertação também carrega um pedacinho do imenso amor que sinto por você.

À minha mãe, Elizabete, e à minha irmã, Laura, pelo amor incondicional e por serem meu alicerce. A toda a minha família, pelo incentivo constante.

E, não menos importante, a mim mesma, por nunca ter deixado de acreditar no poder transformador da educação e por ter persistido até alcançar este sonho.

RESUMO

Notiomastodon platensis (Ameghino, 1888) é o único gonfotério endêmico da América do Sul, com ampla distribuição geográfica e temporal durante o Quaternário. Apesar dos avanços no conhecimento sobre sua taxonomia, paleoecologia e variação morfológica, padrões de dimorfismo sexual ainda não haviam sido caracterizados quantitativamente para a espécie. Este estudo teve como objetivo reconhecer e caracterizar o dimorfismo sexual em *Notiomastodon platensis* a partir de análises morfométricas de elementos pós-cranianos e mandibulares, considerando possíveis influências ontogenéticas, geográficas e temporais. Foram analisados 52 espécimes provenientes de oito países da América do Sul, compreendendo 23 fêmures, sete úmeros, cinco tíbias e 17 mandíbulas, mensurados por meio do software ImageJ. Os dados foram submetidos a análises morfométricas e estatísticas, incluindo agrupamento não supervisionado por *k-means* e, para as mandíbulas, Análise de Componentes Principais (PCA). Os fêmures forneceram a principal evidência de dimorfismo sexual, apresentando dois grupos morfométricos sem sobreposição, interpretados como fêmeas e machos adultos. Os machos apresentaram fêmures aproximadamente 20–23% maiores que os das fêmeas, com diferenças significativas no comprimento total e na largura da diáfise ($p < 0,001$). O *k-means*, realizado sem informação prévia sobre o sexo atribuído aos indivíduos, recuperou os mesmos agrupamentos com 100% de concordância (ARI = 1,00), reforçando a estrutura bimodal dos dados. Em contraste, o índice de robustez não diferiu significativamente entre os grupos, indicando que o dimorfismo se expressa predominantemente no tamanho absoluto do fêmur. Úmeros e tíbias apresentaram tendências compatíveis com esse padrão, embora a baixa amostragem tenha limitado as inferências estatísticas. Nas mandíbulas, o PC1 explicou 75% da variação morfométrica e correspondeu principalmente a um eixo de tamanho geral; contudo, a distribuição contínua e estatisticamente unimodal não sustentou, isoladamente, a existência de dois grupos sexuais discretos, possivelmente devido à influência ontogenética. Em conjunto, os resultados sustentam a presença de dimorfismo sexual de tamanho em *Notiomastodon platensis*, com machos maiores que as fêmeas, padrão congruente com outros proboscídeos fósseis e atuais, contribuindo para a compreensão da paleobiologia, estrutura populacional e ecologia da espécie.

Palavras-chave: Gomphotheriidae; Morfometria; Paleobiologia; Megafauna; Pleistoceno.

ABSTRACT

Notiomastodon platensis (Ameghino, 1888) is the only gomphothere endemic to South America, boasting a broad geographic and temporal distribution during the Quaternary. Despite advances in knowledge regarding its taxonomy, paleoecology, and morphological variation, patterns of sexual dimorphism had not yet been quantitatively characterized for the species. This study aimed to identify and characterize sexual dimorphism in *Notiomastodon platensis* through morphometric analyses of postcranial and mandibular elements, while accounting for potential ontogenetic, geographic, and temporal influences. Fifty-two specimens from eight South American countries were analyzed comprising 23 femora, seven humeri, five tibiae, and 17 mandibles and measured using ImageJ software. The data underwent morphometric and statistical analyses, including unsupervised k-means clustering and, for the mandibles, Principal Component Analysis (PCA). The femora provided the primary evidence of sexual dimorphism, revealing two non-overlapping morphometric groups interpreted as adult females and males. Male femora were approximately 20–23% larger than those of females, with significant differences in total length and diaphysis width ($p < 0.001$). K-means clustering, performed without prior information regarding the individuals' sex, recovered the same groupings with 100% agreement (ARI = 1.00), reinforcing the bimodal structure of the data. In contrast, the robustness index did not differ significantly between the groups, indicating that dimorphism is expressed predominantly through absolute femoral size. Humeri and tibiae showed trends consistent with this pattern, although small sample sizes limited statistical inferences. In the mandibles, PC1 explained 75% of the morphometric variation and corresponded primarily to a general size axis; however, the continuous and statistically unimodal distribution did not, in isolation, support the existence of two discrete sexual groups, possibly due to ontogenetic influence. Taken together, the results support the presence of size-based sexual dimorphism in *Notiomastodon platensis* with males being larger than females a pattern consistent with other fossil and extant proboscideans, thereby contributing to the understanding of the species' paleobiology, population structure, and ecology.

Keywords: Gomphotheriidae; Morphometry; Paleobiology; Megafauna; Pleistocene.

SUMÁRIO

	10
1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	14
3. MATERIAIS E MÉTODOS	14
3.1. Materiais	14
3.2 Análise Morfológica	17
3.3 Ossos longos	18
3.4 Mandíbulas	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
4.1 Fêmur	23
4.2 Úmero	26
4.3 Tíbia	27
4.4 Mandíbula	29
4.5 O dimorfismo sexual em Notiomastodon platensis	31
4.6 Implicações paleoecológicas do dimorfismo sexual em Notiomastodon platensis	37
5. DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA E POPULARIZAÇÃO DA CIÊNCIA	41
6. CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1. INTRODUÇÃO

Dentre os proboscídeos da Família Gomphotheriidae, o gênero *Notiomastodon* Cabrera, 1929, é um dos mais abundantes no registro fóssilífero, sendo o único endêmico da América do Sul (Mothé *et al.*, 2017) e representado por somente uma espécie, *Notiomastodon platensis* (Ameghino, 1888), segundo revisão taxonômica de Mothé *et al.* (2012, 2019).

Suas ocorrências datam do Pleistoceno inferior ao Holoceno inicial, sendo seus fósseis achados de forma abundantes em cavernas, tanques e sedimentos quaternários. Embora até recentemente houvesse escassez de datações absolutas, um estudo recente utilizando a técnica de Ressonância de Spin Eletrônico (ESR) obteve idades numéricas variando de 47 ± 7 mil a 560 ± 40 mil anos, sendo esta última a idade numérica mais antiga já registrada para a espécie, correspondente ao Pleistoceno Médio (Mothé *et al.*, 2025). Já a distribuição cronológica de *Notiomastodon platensis* alcançou tempos mais recentes, com registros há 8 mil anos, no Nordeste brasileiro (Faria *et al.*, 2023).

O conhecimento sobre essa espécie foi bastante aprofundado nas últimas décadas, em decorrência do avanço na compreensão de suas características diagnósticas, variações individuais, paleoecologia e surgimento de novos materiais e localidades por todo o continente. Esses animais chegaram ao continente sul-americano por meio do Grande Intercâmbio Biótico Americano (GABI, em inglês), um evento evolutivo que transformou a história dos mamíferos no Novo Mundo (Woodburne, 2010; Ferretti, 2010).

Dada a riqueza de seus registros, *Notiomastodon* é considerado um dos principais representantes da megafauna quaternária sul-americana, ocorrendo da costa pacífica à costa atlântica, e de altas altitudes andinas às planícies do nordeste brasileiro, exceto Guiana, Guiana Francesa e Suriname (Mothé e Avilla, 2015; Mothé *et al.*, 2017; Mothé *et al.*, 2024; Alberdi e Prado, 2022; Paula-Couto, 1979).

Nos últimos anos, a paleobiologia de *Notiomastodon* vem sendo explorada, permitindo reconhecimento de interações ecológicas de herbivoria (paleodietas, Asevedo *et al.*, 2012; Dantas *et al.*, 2017, 2020, 2022; González-Guarda *et al.*, 2018, 2024), predadores e consumidores (de besouros necrófagos à predação de grandes carnívoros extintos, e também o homem pré-histórico, Araújo-Júnior *et al.*, 2011; Dominato *et al.*, 2011; Mothé *et al.*, 2020; Carrillo-Briceño *et al.*, 2026), microorganismos parasitas e/ou patogênicos (Mothé *et al.*, 2021), além de paleopatologias ósseas e dentárias (Barbosa *et al.*, 2017) e estudos que realizaram a extração/compreensão do DNA antigo (Baleka *et al.*, 2022).

O polimorfismo em *Notiomastodon* ocorre principalmente nas presas superiores (curvatura e presença de esmalte) e na morfologia dos pré-molares e molares (na complexidade das cúspides da coroa dentária e seus padrões de desgaste), entretanto, ainda não se sabe se estas variações seguem padrões regionais, temporais, populacionais ou se estas variações também podem ser decorrentes de dimorfismo sexual (Simpson e Paula-Couto, 1957; Mothé *et al.*, 2012; 2017; Lucas *et al.*, 2013).

Por dimorfismo sexual, entende-se as variações morfológicas entre indivíduos machos e fêmeas da mesma espécie (Pough *et al.*, 2003). Em espécies fósseis, esse dimorfismo pode manifestar-se por meio de diferenças nas proporções esqueléticas e dentárias, além da presença ou aumento de estruturas específicas em apenas um dos gêneros (Smith e Fisher, 2013). A literatura registra o dimorfismo sexual em diferentes elementos ósseos de proboscídeos extintos e vivos, incluindo diferenças na sínfise mandibular, na massa e proporção corporal, na robustez dos ossos longos (fêmur, úmero, tíbia e ulna), na morfologia dos ossos do quadril, nas dimensões e curvatura das presas e nas características da primeira vértebra cervical (atlas). Essas diferenças foram descritas em *Protanancus* (Arambourg, 1945), em um proboscídeo bunodonte da China (Wang *et al.*, 2015), em *Mammuthus* (Haynes, 1991; Moots *et al.*, 2026) conforme ilustrado na Fig. 1, no mastodonte-americano (*Mammuth americanum*) e nos elefantes-africanos atuais (*Loxodonta africana* e *L. cyclotis*), nos quais os machos tendem a apresentar maior porte e robustez que as fêmeas (Haynes, 1991; Smith e Fisher, 2013).

No entanto, essas variações ainda não foram quantificadas e qualificadas para *Notiomastodon platensis*, gerando uma lacuna no conhecimento mais detalhado sobre o polimorfismo da espécie. O preenchimento dessa lacuna é fundamental para a compreensão da história evolutiva dos proboscídeos em nível global e, especialmente, dos megamamíferos sul-americanos. Embora estudos recentes tenham avançado em diversos aspectos biológicos e morfológicos desses proboscídeos, as análises sobre os padrões morfológicos associados ao dimorfismo sexual e às variações individuais de gênero permanecem inexistentes. Compreender tais diferenças permitirá refinar as identificações de espécimes e interpretações sobre *Notiomastodon platensis*, contribuindo para inferências mais precisas sobre suas estratégias de vida, dinâmicas populacionais e processos evolutivos.

A hipótese principal é a validade de padrões morfológicos associados ao dimorfismo sexual em *Notiomastodon platensis* que vão além da variação individual, temporal e/ou regional. Caso validada esta hipótese, haverá reconhecimento de pelo menos dois grupos de materiais fósseis com diferenças entre si em relação a tamanho e robustez, com ampla

representatividade temporal e geográfica da espécie, cobrindo grande parte de sua ocorrência no continente do Pleistoceno médio ao tardio, representando machos (maiores e mais robustos, segundo o padrão já conhecido para proboscídeos do Quaternário) e fêmeas (menores e menos robustas), dimorfismo também observado em outros proboscídeos, como os mamutes, os mastodontes americanos e os elefantes modernos, que apresentam dimorfismo sexual marcante, com machos adultos significativamente maiores e mais robustos que as fêmeas (Haynes, 1991; Pasenko, 2012; Smith e Fisher, 2013).

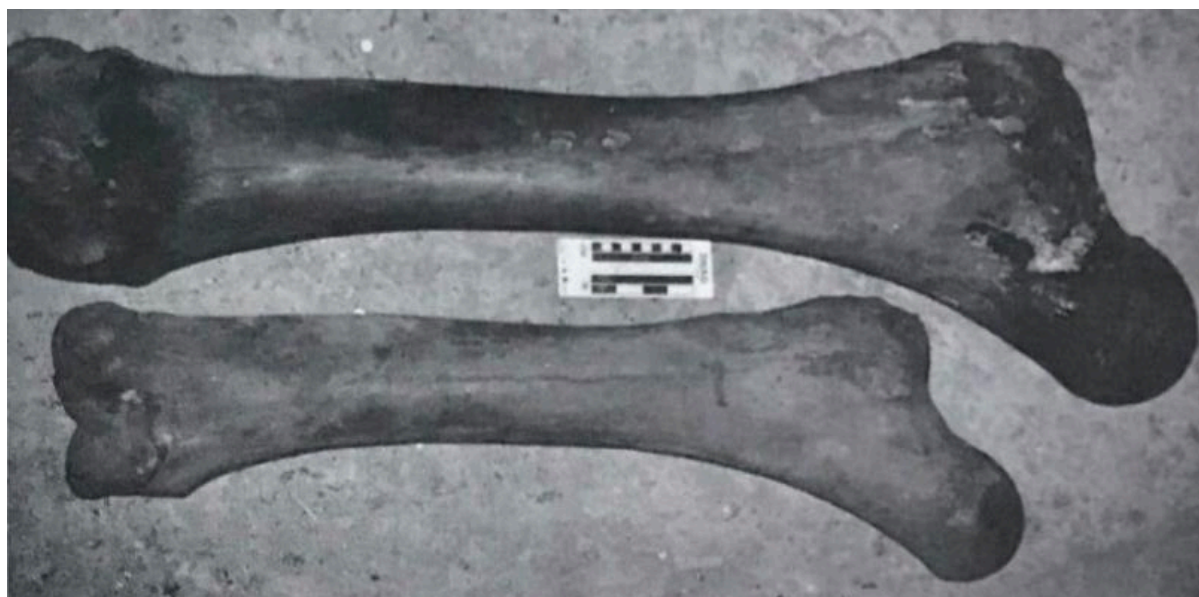


Figura 1: Fêmures de mamutes (*Mammuthus primigenius*) adultos provenientes da Rússia (sítio Berelyokh, Sibéria), mostrando o padrão reconhecido na literatura para dimorfismo entre machos (fêmur superior) e fêmeas (fêmur inferior). Modificado de Haynes (1991).

Se a hipótese principal for refutada, possivelmente a análise de morfologia e comparação de índices de robustez revelarão morfótipos com diferenças mais sutis ou gradacionais (ou até mesmo nenhuma diferença significativa de robustez/tamanho), relacionados a regiões geográficas, variações individuais e/ou populacionais, ou temporais ao longo do Quaternário.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste estudo é reconhecer a presença de dimorfismo sexual em *Notiomastodon platensis*, isto é, identificar indivíduos machos e fêmeas através de análises morfológicas e anatômicas de materiais fósseis pós-cranianos e mandibulares. Como objetivos específicos, buscou-se caracterizar possíveis variações de caráter etário/ontogenético ou regional na amostragem, a fim de delimitar os padrões populacionais deste mastodonte, bem como entender seu polimorfismo em contraste a outras linhagens de proboscídeos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

Os materiais fósseis analisados são provenientes de localidades distribuídas por toda a América do Sul (Chile, Argentina, Uruguai, Brasil, Colômbia, Peru, Venezuela e Equador - Tabela 1), datando do Pleistoceno médio/tardio ao Holoceno inicial, representando amplamente as ocorrências temporal e geográfica de *Notiomastodon platensis* (Mothé *et al.*, 2017; Alberdi e Prado, 2022). Estes foram fotografados com câmera digital Nikon D3200, com escala, desde o ano de 2007, e fazem parte do acervo digital do Grupo de Estudos em Megafauna, parte do Laboratório de Vertebrados do Instituto de Biociências da UNIRIO (GEM-UNIRIO).

Este acervo digital inclui centenas de espécimes dentários, mandibulares e de pós-crânio, representando uma diversidade significativa de indivíduos de várias faixas etárias (de filhotes a adultos senis). Os espécimes analisados neste estudo fazem parte das coleções paleontológicas das seguintes instituições: Museu de Ciências da Terra (MCT, DGM, Brasil), Museu de Ciências Naturais da PUC Minas (MCL, Brasil), Museu de Paleontologia Mário Costa barberena (EPMPV, Brasil), Museo Paleontologico Megaterio (MPM, Equador), Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales (MECN, Equador), Museu Nacional de História Natural (MNHN, Uruguai), Museu Paleontológico Alejandro Berro (MPAB, Uruguai) Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (MUSM, Peru), Museo de La Plata (MLP, Argentina), Centro de Investigación Científica y de Transferência Tecnológica a la Producción (CICYTTP, Argentina), Museo de Ciencias Naturales Bernardino Rivadavia (MACN, Argentina), Museu Nacional de História Natural de Santiago (SGO, Chile), Museo Escolar Laguna Tagua Tagua (MELT, Chile), Centro de Investigaciones Antropológicas, Arqueológicas y Paleontológicas (CIAPP, Venezuela), Servicio Geológico Colombiano (INGEOMINAS, Colômbia), Museo Geológico José Royo y Gomez (N, Colômbia).

Foram priorizados materiais completos, sem deformidades e que apresentassem fusão de epífises e diáfise (em caso de ossos longos), estando estas fusionadas, representando maturidade óssea e consequentemente, indivíduos adultos. Foram analisados fêmures, tíbias, úmeros e mandíbulas de *Notiomastodon platensis*, totalizando 52 espécimes: 23 fêmures, 7 úmeros, 5 tíbias e 17 mandíbulas, cujos espécimes e respectivas informações estão descritos na Tabela 1. No caso do úmero, quatro dos sete espécimes correspondem a indivíduos juvenis ou filhotes, incluídos no acervo consultado, mas tratados separadamente na análise, conforme detalhado na seção de Resultados.

Além do acervo fotográfico outras consultas foram realizadas por meio de visitas presenciais a duas importantes coleções paleontológicas com acervos de *Notiomastodon platensis*: o Museu de Ciências da Terra (Rio de Janeiro) e o Museu Câmara Cascudo (Natal, Rio Grande do Norte). Estas visitas permitiram a observação direta de materiais fósseis, complementando o banco de imagens do GEM-UNIRIO e contribuindo para uma compreensão mais detalhada das variações morfológicas da espécie.

Tabela 1: Relação dos espécimes de *Notiomastodon platensis* utilizados neste estudo, com indicação dos elementos anatômicos (fêmur, tíbia, úmero e mandíbula) e proveniência. Todos os espécimes analisados são de adultos, exceto por alguns úmeros marcados com (*). SN = Sem Número de coleção

Espécime/Nº de Tombo	Localidade	Tipo de Elemento
MPM847	Tanque Loma, Equador	Fêmur
MNHN-57	Canelones, Uruguai	Fêmur
MUSM 82	Arequipa, Perú	Fêmur
Araxá SN 2	Araxá, Brasil	Fêmur
MLP 8-176 - 02	Província de Buenos Aires, Argentina	Fêmur
MECN 98	Bolívar, Equador	Fêmur
MECN 420	Bolívar, Equador	Fêmur
MLP 8-30	Província de Buenos Aires, Argentina	Fêmur
N 3353	Mosquera, Colômbia	Fêmur
MELT C2H26	Tagua Tagua, Chile	Fêmur
SGO-PV-241	Tagua Tagua, Chile	Fêmur
CIAPP-312	Taima-Taima, Venezuela	Fêmur
MLP 8-157 - 03	Província de Buenos Aires, Argentina	Fêmur
Araxá SN 1	Araxá, Brasil	Fêmur
CICYTTP-PV-M-3-402	Entre Ríos, Argentina	Fêmur
CIAAP-111	Taima-Taima, Venezuela	Fêmur

Espécime/Nº de Tombo	Localidade	Tipo de Elemento
SGO-PV-694	Tagua Tagua, Chile	Fêmur
MLP 8-1 - 01	Buenos Aires, Argentina	Fêmur
MECN Exibição SN	Santa Elena, Equador	Fêmur
MCL 18960	Toca dos Ossos, Brasil	Fêmur
MLP 8-3	Rio Matanza, Argentina	Fêmur
MLP 8-67	Buenos Aires, Argentina	Fêmur
MLP 8-25	Mercedes, Buenos Aires, Argentina	Fêmur
MPAB-914	Uruguai	Fêmur
MPAB-4001	Uruguai	Fêmur
DGM 20M	Araxá, Brasil	Fêmur
Úmero SN	Santa Vitória do Palmar, Brasil	Úmero
SGO-PV-267	Tagua Tagua, Chile	Úmero
SGO-PV-267	Tagua Tagua, Chile	Úmero*
MELT C4N17	Tagua Tagua, Chile	Úmero*
MELT Úmero 1 a	Tagua Tagua, Chile	Úmero*
MELT Úmero 1 b	Tagua Tagua, Chile	Úmero*
MCT 3	Araxá, Brasil	Úmero
MCT Tíbia 19	Araxá, Brasil	Tíbia
SGO-PV-687 - A	Tagua Tagua, Chile	Tíbia
SGO-PV-687 - B	Tagua Tagua, Chile	Tíbia
Tíbia SN 1	Araxá, Brasil	Tíbia
Tíbia SN 2	Araxá, Brasil	Tíbia
Mandíbula SN 1	Araxá, Brasil	Mandíbula
Mandíbula SN 2	Araxá, Brasil	Mandíbula
MNHN 1886	Montevideo, Uruguai	Mandíbula
EPMPV S/N	Arroio Chuí, Brasil	Mandíbula

Espécime/Nº de Tombo	Localidade	Tipo de Elemento
MECN - 133	Bolívar, Equador	Mandíbula
INGEOMINAS SN	Cundinamarca, Colômbia	Mandíbula
MNHN 1748	Bogotá, Colômbia	Mandíbula
MLP 182	La Plata, Argentina	Mandíbula
MECN V - 160	Santa Elena, Equador	Mandíbula
MACN 2157	Buenos Aires, Argentina	Mandíbula
MACN 44	Buenos Aires, Argentina	Mandíbula
MACN 6068	Córdoba, Argentina	Mandíbula
MACN 5213	Santa Fé, Argentina	Mandíbula
MLP 8 - 1	Arrecifes, Argentina	Mandíbula
MUSM 81	Pasamayo, Lima, Peru	Mandíbula
MUSM 83	Canta, Lima, Peru	Mandíbula
MACN 13559	Buenos Aires, Argentina	Mandíbula

3.2 Análise Morfológica

As análises morfológicas realizadas incluíram a avaliação de índices de robustez em fêmures, úmeros e tíbias, com base em medidas propostas na literatura para diversos proboscídeos, incluindo *Notiomastodon platensis* (Ferretti, 2008, 2010; Mothé *et al.*, 2012, 2017; Larramendi *et al.*, 2017). As imagens com escala foram analisadas por meio do software gratuito *ImageJ*.

As medidas e índices gerados foram tabelados, juntamente com estimativas de faixa etária de cada indivíduo (seguindo Simpson e Paula-Couto, 1957; Mothé *et al.*, 2010), localidade de origem, idade geológica quando disponível, além de características morfológicas particulares de cada espécime. Os dados foram tratados estatisticamente por meio de métodos exploratórios, incluindo análise de agrupamento (*k-means*) e análise de componentes principais (PCA) (Jolliffe; Cadima, 2016). Espécimes deformados, incompletos ou fragmentados não foram considerados nas análises quantitativas, seguindo o critério de integridade/maturidade adotado em estudos de ossos longos de proboscídeos (Bader *et al.*, 2024).

3.3 Ossos longos

Em uma primeira etapa, avaliou-se as variações morfológicas e anatômicas de 23 fêmures completos de *Notiomastodon platensis*, bem como de 7 úmeros e 5 tíbias, provenientes de diversas localidades da América do Sul (Brasil, Chile, Colômbia, Uruguai, Peru, Venezuela, Argentina e Equador - ver Tabela 1), abrangendo uma ampla faixa estratigráfica e temporal. Embora Bolívia e Paraguai também tenham registros de *Notiomastodon platensis*, estes são mais fragmentários ou com outros elementos fósseis, como dentes e vértebras, e por isso não foram incluídos nas análises. As localidades de Tagua Tagua, no Chile, e Araxá, no Brasil, foram as que apresentaram maior variedade de fósseis de um mesmo local, embora a região do Rio da Prata (Argentina e Uruguai) reúna diversas localidades com materiais de *Notiomastodon platensis*, principalmente fêmures e mandíbulas.

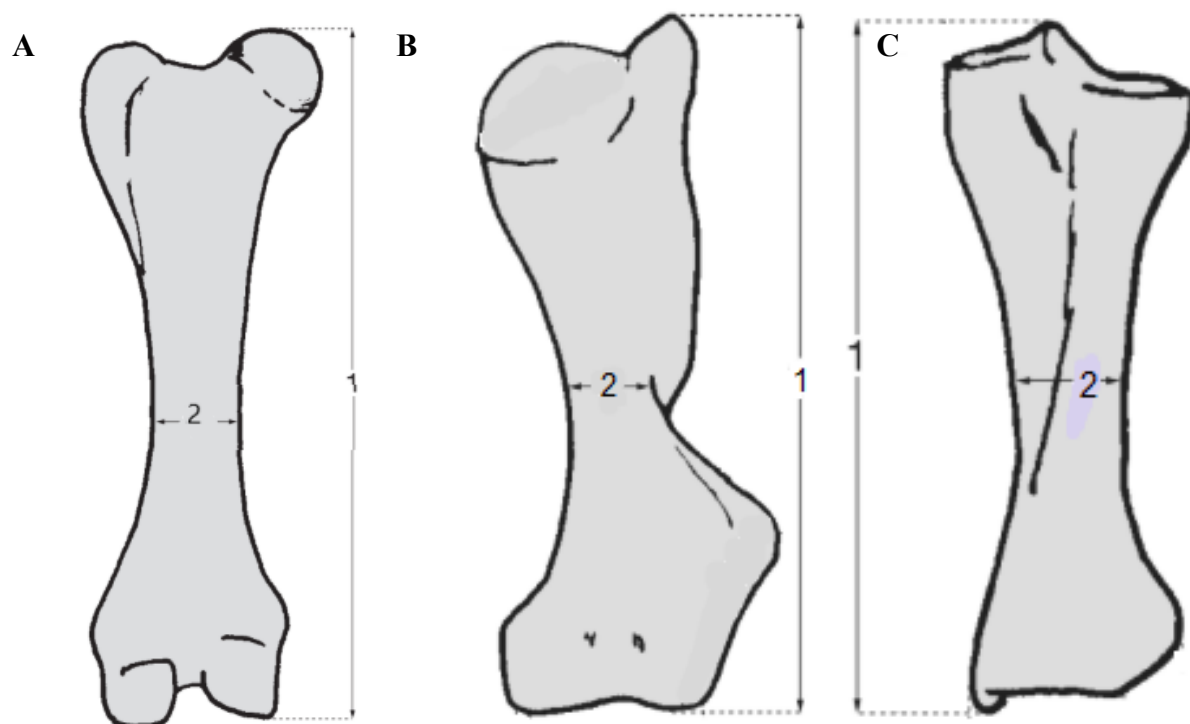


Figura 2: Medições dos ossos longos de *Notiomastodon platensis*, sendo A) fêmur; B) úmero; e C) tíbia. A medida 1 representa o comprimento total do osso longo analisado, e a medida 2 representa a menor largura da diáfise de cada elemento. Adaptado de Ferretti (2010) e Haynes (1991).

As imagens digitais com escala foram analisadas no software livre *ImageJ* (Schneider *et al.*, 2012) para a obtenção de medidas lineares e índices de robustez. As medidas baseiam-se nas propostas de Ferretti (2010) para *Notiomastodon platensis* e de Haynes (1991) para *Mammuthus*, sendo usadas duas dimensões principais: o comprimento total do osso longo (medida 1: do topo da epífise proximal até a base da epífise distal) e a menor largura da diáfise em vista frontal (medida 2). A partir delas calculou-se o índice de robustez ($\text{largura/comprimento} \times 100$).

A atribuição sexual dos espécimes baseou-se no padrão de dimorfismo sexual amplamente documentado em proboscídeos, caracterizado pelo maior porte e robustez dos machos em relação às fêmeas (Haynes, 1991; Lee e Moss, 1995; Larramendi *et al.*, 2017). Com base nesse critério, os seis espécimes de maior porte foram atribuídos a machos ($n = 6$), enquanto os 17 menores foram atribuídos a fêmeas ($n = 17$). Como essa classificação foi estabelecida com base no tamanho e nas proporções ósseas, os testes de comparação foram empregados para avaliar as diferenças morfométricas entre os grupos previamente definidos. Complementarmente, utilizou-se o agrupamento não supervisionado para investigar se os dados morfométricos formavam grupos distintos sem o uso prévio das classificações sexuais, permitindo avaliar se a estrutura dos dados era compatível com a separação proposta.

Para cada variável (de cada elemento ósseo) calcularam-se estatísticas descritivas por gênero (média, desvio-padrão e amplitude) e o índice de dimorfismo sexual (razão entre a média dos machos e a das fêmeas). A comparação entre os gêneros adotou o teste não-paramétrico U de *Mann–Whitney*, em vez do teste t de *Student*. Essa escolha justifica-se pelas características da amostra: com grupos pequenos e de tamanhos desiguais o teste t torna-se mais sensível a desvios da normalidade e a diferenças de variância entre os grupos, ao passo que o teste U de *Mann–Whitney*, por ser baseado em postos, não depende dessas suposições, mostrando-se mais adequado a esse cenário. Como medida do tamanho do efeito, calculou-se o d de *Cohen* a partir das médias e dos desvios-padrão dos grupos.

Como abordagem exploratória e verificação independente da classificação prévia, aplicou-se o agrupamento por *k-means* ($k = 2$) sobre as duas dimensões morfométricas padronizadas, avaliando-se a concordância entre os agrupamentos gerados e o gênero atribuído a priori pela proporção de coincidência e pelo índice de Rand ajustado (ARI). Testou-se ainda a solução de três grupos ($k = 3$), a fim de verificar possíveis subdivisões internas. Essa abordagem segue a lógica de estudos que investigam distribuições bimodais para inferir variação sexual em táxons fósseis (Saitta, 2015; Pinto *et al.*, 2024).

Para o fêmur, descrito por apenas duas medidas, a Análise de Componentes Principais (PCA) apenas reproduziria o eixo de tamanho (PC1), sem reduzir dimensionalidade nem acrescentar informação à análise bivariada; por isso o agrupamento foi feito diretamente por *k-means*. Esse comportamento é esperado: Belyaev *et al.* (2025), ao aplicar PCA sobre valores absolutos de medidas de proboscídeos, obtiveram um único componente dominante (~90 % da variância) associado ao tamanho.

As medições do úmero e da tíbia seguiram os protocolos propostos por Ferretti (2010), sendo consideradas, para ambos os elementos, duas dimensões principais: comprimento total e menor largura da diáfise, obtidas com auxílio do software *ImageJ*. A partir dessas medidas, foi calculado o índice de robustez, seguindo o mesmo procedimento adotado para os fêmures.

Para a inferência de dimorfismo sexual, adotou-se o mesmo critério aplicado ao fêmur, considerando-se apenas indivíduos adultos; espécimes juvenis e o filhote foram excluídos dessa etapa, por não permitirem inferência de gênero com base no tamanho (indivíduos imaturos são pequenos em razão da idade, e não por conta de dimorfismo sexual). Dado o número reduzido de exemplares adultos (úmero, $n = 3$ de um total de 7 mensurados; tíbia, $n = 5$), esses elementos foram tratados de forma descritiva e exploratória, sem aplicação de teste estatístico formal, servindo como comparação qualitativa com o padrão observado no fêmur.

3.4 Mandíbulas

Também foram analisadas 17 mandíbulas (Fig. 3) de *Notiomastodon platensis*, provenientes de localidades como Brasil, Argentina, Equador, Colômbia e Peru, com as medições seguindo as propostas de Ferretti (2010). Entretanto, foram selecionadas apenas as medidas consideradas mais relevantes para os objetivos deste estudo, priorizando aquelas que otimizassem o N amostral do registro fossilífero de *Notiomastodon* (espécimes mais completos e com dentição adulta reconhecível). Dessa forma, foi mantida a numeração original adotada pelo autor, motivo pelo qual a sequência a seguir das medidas não é contínua. Foram consideradas as seguintes medidas: 1. Comprimento do côndilo até o infradentário; 3. Comprimento do infradentário até o início do ramo ascendente; 4. Comprimento do infradentário até a borda oral do segundo molar; 5. Comprimento da borda oral do segundo molar até o início do ramo ascendente; 8. Comprimento do gônio caudal até a margem anterior do ramo; 10. Altura oral do ramo (do gônio ao córion); 11. Altura aboral do ramo (do gônio ao côndilo); e 12. Altura do corpo mandibular na altura do molar.

As medidas foram extraídas com o auxílio do software *ImageJ*, calibrando-se a escala de cada imagem a partir do instrumento de referência (escala em cm) presente na respectiva fotografia. Por dispor de um número maior de variáveis morfométricas (oito medidas), aplicou-se a este elemento a Análise de Componentes Principais (PCA), técnica de redução de dimensionalidade que condensa as variáveis originais em um conjunto menor de componentes, os quais preservam a maior parte da variância dos dados (Jolliffe e Cadima, 2016).

Os componentes resultantes serviram de base para o agrupamento não supervisionado por *k-means* ($k = 2$), que reúne os indivíduos conforme a similaridade morfométrica (Ding e He, 2004). Diferentemente do fêmur, para o qual, por haver apenas duas medidas, o *k-means* foi aplicado diretamente às dimensões, na mandíbula a PCA cumpre função efetiva de síntese das oito variáveis. A amostra reúne indivíduos adultos de diferentes idades, sem que tenha sido possível controlar sistematicamente a idade dos espécimes para comparar indivíduos com idades semelhantes. Como a idade influencia o tamanho e a forma da mandíbula nos proboscídeos (Huttunen e Göhlich, 2002; Adisajjana e Yudha, 2025), essa heterogeneidade foi considerada na interpretação dos resultados.

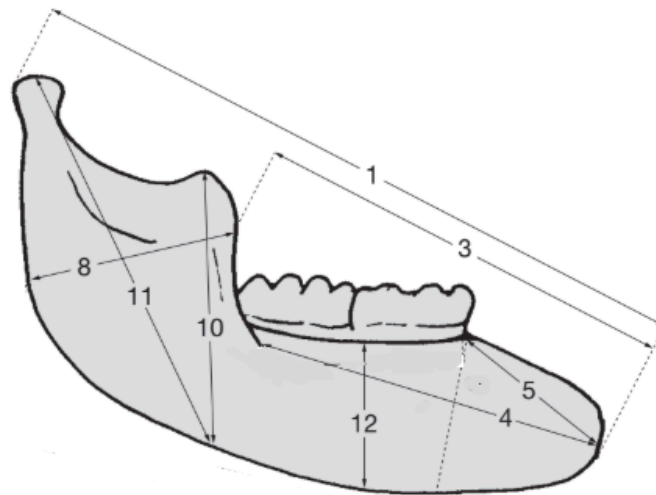


Figura 3: Medições da mandíbula de *Notiomastodon platensis* adulto, em vista lateral labial. Adaptado de Ferretti (2010).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A predominância dos espécimes analisados foi do osso fêmur, seguido das mandíbulas e demais ossos longos, sendo estes provenientes de 8 países sul americanos que apresentam abundantes registros de *Notiomastodon platensis* (Fig. 4). Embora Bolívia e Paraguai também tenham registros de *Notiomastodon*, estes são mais fragmentários e por isso não foram incluídos nas análises. As localidades de Tagua Tagua, no Chile, e Araxá, no Brasil, foram as que apresentaram maior variedade de fósseis de um mesmo local, embora a região do Rio da Prata reúna diversas localidades com materiais de *Notiomastodon*, principalmente fêmures e mandíbulas.

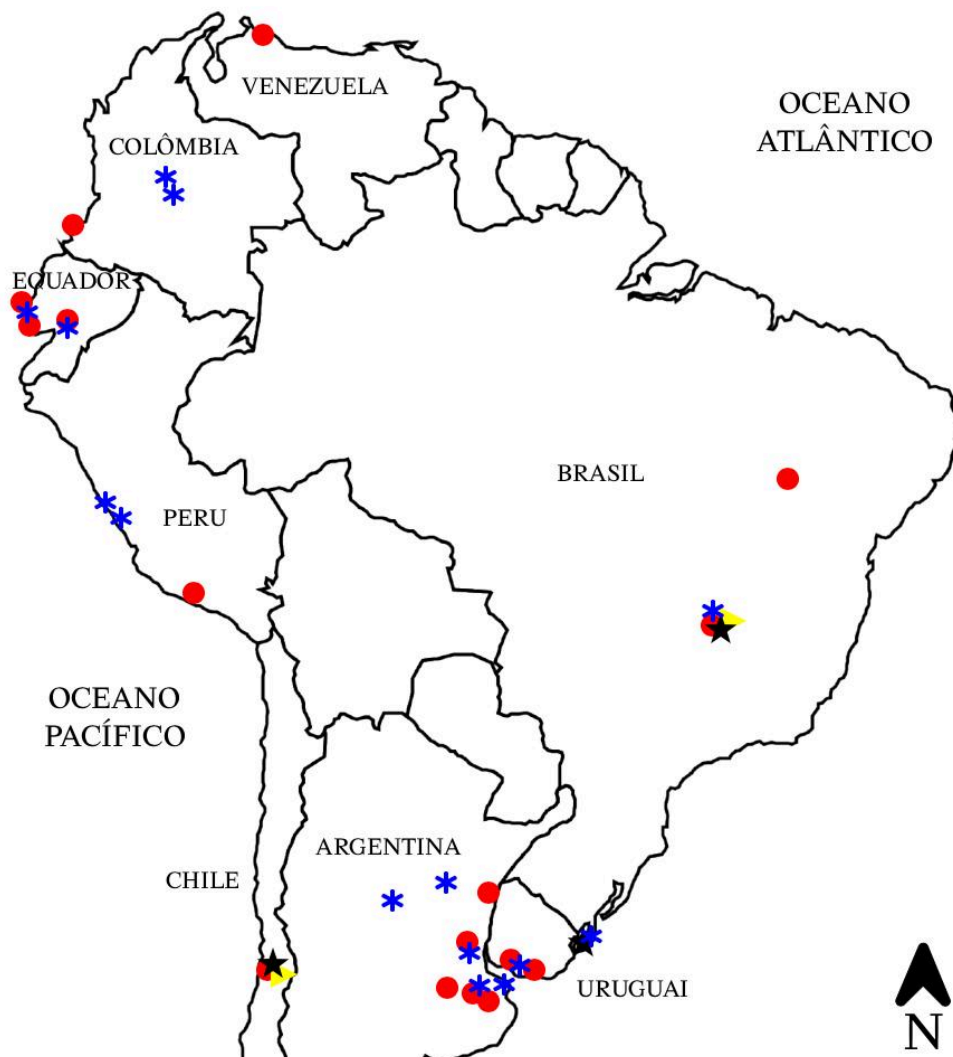


Figura 4: Mapa das localidades de origem dos espécimes de *Notiomastodon platensis* analisados neste estudo. Pontos vermelhos representam fêmures, asteriscos azuis representam mandíbulas, estrelas pretas representam úmeros e triângulos amarelos representam tíbias. Foram nomeados somente os países com materiais analisados.

Embora seja um dos representantes da megafauna do Quaternário da América do Sul com registro fóssil mais abundante, a delimitação da amostragem para uso de espécimes fósseis de indivíduos adultos sem deformações e/ou fragmentação expressiva limitou o número de espécimes analisados neste estudo. Ainda, observa-se que a associação de elementos fósseis de um mesmo indivíduo é rara, sendo os espécimes mais completos um proveniente do Equador (descrito por Ferretti 2010) e outro da Venezuela (descrito em partes por Carrillo-Briceño *et al.*, 2026), o que também limitou a execução do estudo ao N amostral disponível.

4.1 Fêmur

O fêmur é o osso mais longo do esqueleto dos proboscídeos e relaciona-se com a morfologia da pelve e a sustentação da massa corporal mais posterior do animal (Haynes, 1991). Inicialmente, as medidas de comprimento total (medida 1) e largura da diáfise (medida 2) foram tabeladas e plotadas em gráfico de dispersão simples, que exibiu uma distribuição bimodal dos indivíduos analisados (Fig. 5).

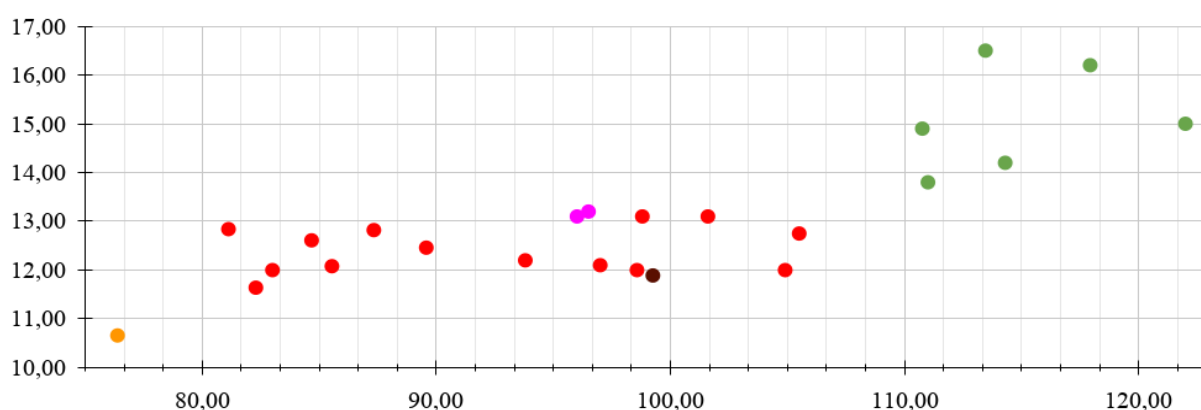


Figura 5: Gráfico de dispersão das medidas 1 (eixo x) e 2 (eixo y) nos fêmures de *Notiomastodon platensis* da América do Sul. Pontos vermelhos, rosa, vinho e laranja representam indivíduos reconhecidos como fêmeas (grupo 1), e pontos verdes representam indivíduos reconhecidos como machos (grupo 2). O indivíduo em rosa (com dois fêmures) representa uma fêmea em idade adulta (24-34 anos, segundo a dentição associada), enquanto o vinho representa uma fêmea adulta madura a senil (47-53 anos, segundo a dentição associada), e o indivíduo em laranja apresenta a linha de sutura entre a epífise proximal e a diáfise ainda com marcas, representando possivelmente uma fêmea jovem/subadulta, por suas proporções.

O grupo 1 reuniu 16 indivíduos (excluindo-se o representado pelo ponto laranja) e apresentou intervalos de cerca de 81 a 105 cm (média de 93,3 cm) de comprimento total do fêmur e de 11,6 a 13,2 cm (média de 12,4 cm) de largura da diáfise. Enquanto o grupo 2 que reuniu indivíduos maiores, apresentou intervalos menores, de 110 a 122 cm (média de 114,9 cm) e 13,8 a 16,2 cm (média de 15,1 cm), respectivamente. É importante ressaltar que não há sobreposição de medidas entre os agrupamentos. Embora a largura da diáfise exiba uma transição próxima, com apenas 0,6 cm de diferença entre os limites de cada grupo (13,2 e 13,8 cm), o comprimento total do fêmur destacou-se como o parâmetro mais evidente para a separação dos grupos, registrando uma lacuna de cerca de 5 cm entre eles. Essa diferença de porte traduziu-se em índices de dimorfismo sexual de 1,23 para o comprimento e 1,20 para a largura, indicando machos cerca de 20 a 23% maiores que as fêmeas, com diferenças estatisticamente significativas em ambas as medidas (Mann–Whitney, $p < 0,001$; d de Cohen = 2,9 e 3,6).

Observa-se a maior variação do grupo 1 sendo no comprimento total do fêmur, em um intervalo de quase 24 cm, que pode ser interpretado como possuindo dois subgrupos, um de menor comprimento (81~90 cm) e um de maior comprimento (93~105 cm). Entretanto, a largura da diáfise do grupo 1 permanece praticamente na mesma faixa, com um intervalo de 1,6 cm de variação, o que justifica o reconhecimento deste grupo como único, embora com maior variabilidade na medida 1. Isso sugere que o eixo transversal do fêmur (largura da diáfise, ou medida 2) não acompanha linearmente o aumento de comprimento dentro do grupo 1, mesmo quando o fêmur do grupo 1 cresce em comprimento (passando entre 81 até 105 cm), a largura da diáfise se mantém proporcionalmente estável e estreita, diferindo do padrão do grupo 2.

Por sua vez, o grupo 2 (machos) exibe uma dispersão ascendente, na qual o aumento do comprimento total do fêmur é menos variável e acompanhado por um espessamento proporcionalmente maior da diáfise, num intervalo de até 2,4 cm, isto é, 50% maior que no grupo 1. Assim, o grupo 2 apresenta fêmures não apenas em uma estrutura mais longa, mas em uma arquitetura óssea exponencialmente mais robusta, possivelmente para sustentar uma massa corporal que cresce de forma desproporcional aos indivíduos do grupo 1 (fêmeas) na vida adulta.

Para testar essa hipótese de forma mais robusta, foi aplicada a técnica de agrupamento não supervisionado (clusterização) *k-means* (Fig. 6), que permite identificar grupos com base na similaridade das medidas morfométricas. É importante ressaltar que o algoritmo foi executado sem qualquer informação sobre o gênero dos indivíduos, utilizando exclusivamente

as duas medidas morfométricas; ainda assim, recuperou exatamente os dois agrupamentos já observados no gráfico de dispersão, com 100% de coincidência ($ARI = 1,00$). Esse resultado demonstra que a estrutura bimodal está contida nos próprios dados morfométricos e não decorre da sexagem atribuída, o que reforça consideravelmente a hipótese de dimorfismo sexual.

Testou-se também a solução de três grupos ($k = 3$), que separaria as fêmeas em menores e maiores. Essa divisão, contudo, mostrou-se menos nítida no gráfico: enquanto os machos permanecem claramente isolados, os dois subconjuntos de fêmeas ficam próximos e sem um limite evidente entre si. A lacuna de comprimento observada entre as fêmeas é compatível com a variação amostral esperada para um conjunto reduzido de indivíduos e não configura uma fronteira biológica, sendo melhor interpretada como variabilidade individual do que como a presença de subgrupos distintos, sobretudo porque a largura da diáfise permanece estável ao longo de toda essa variação.

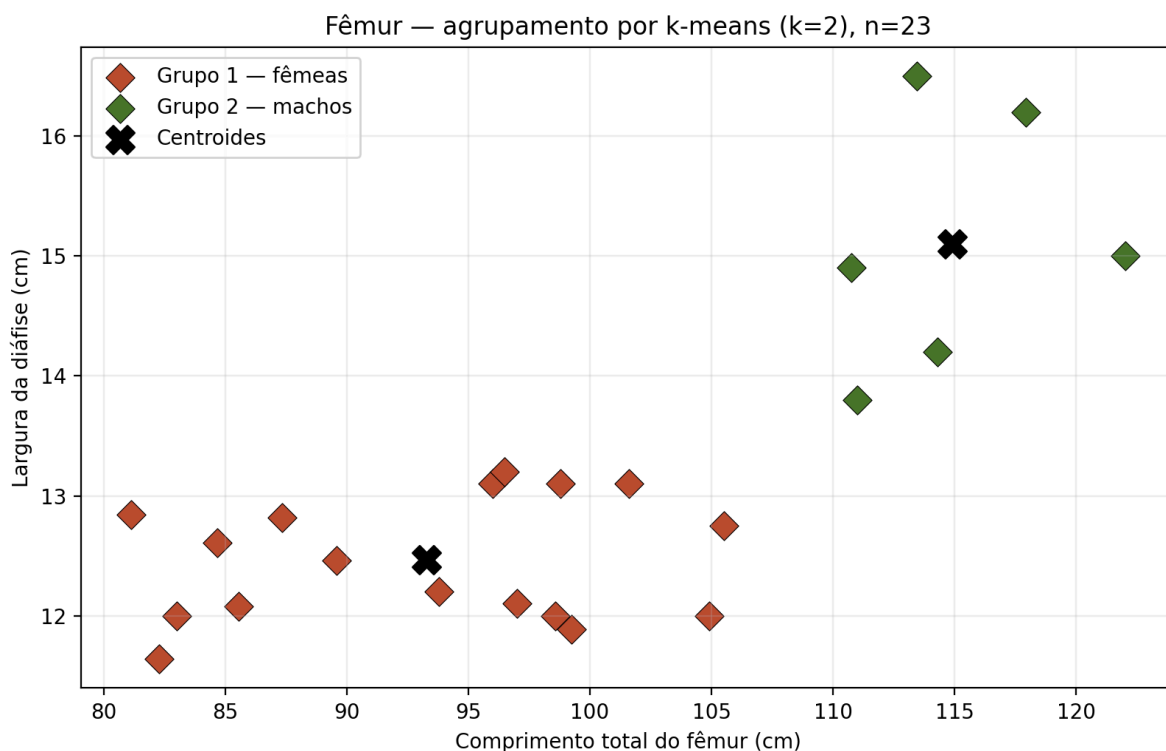


Figura 6: Agrupamento por k -means ($k = 2$) dos 23 fêmures de *Notiomastodon platensis*, obtido exclusivamente a partir do comprimento total e da largura da diáfise. Losangos vermelhos representam o Grupo 1 (fêmeas) e losangos verdes o Grupo 2 (machos); os "X" indicam os centróides de cada grupo. O algoritmo recuperou a mesma separação observada no gráfico de dispersão, com 100% de coincidência com a classificação prévia.

Por fim, em contraste com as medidas absolutas, o índice de robustez (largura da diáfise/comprimento total do fêmur) não diferiu entre os grupos 1 e 2 ($13,5 \pm 1,2$ nas fêmeas; $13,1 \pm 0,9$ nos machos; $p = 0,66$), com amplitudes inteiramente sobrepostas. Esse resultado indica que, ao menos nos fêmures analisados, o dimorfismo sexual em *Notiomastodon platensis* é notável principalmente no tamanho absoluto e no porte do fêmur, e não em uma mudança de proporção morfológica entre machos e fêmeas. Do ponto de vista biomecânico, essa constância no índice de robustez corrobora o reconhecimento de *Notiomastodon* no morfótipo *stout* (típico de gonfoterídeos, como *Cuvieronius*; Bader *et al.*, 2024), cujos elementos pós-cranianos compartilham um padrão estrutural mais conservativo e robusto para dissipar forças e sustentar o peso corporal, mantendo a mesma razão geométrica básica entre machos e fêmeas mesmo diante da disparidade de porte.

4.2 Úmero

Foram mensurados sete úmeros de *Notiomastodon platensis*, dos quais apenas três correspondem a indivíduos adultos; os demais são juvenis e um filhote/imaturo (Tabela 2). Para a inferência de gênero, seguiu-se o mesmo critério adotado no fêmur e descrito na literatura considerando-se somente os adultos, uma vez que indivíduos imaturos (aqueles menores de 12 anos) são pequenos em razão do estágio de desenvolvimento ontogenético, e não do gênero em si. Entre os adultos, os comprimentos variaram de aproximadamente 58 a 108 cm e as larguras de diáfise de 13 a 21 cm.

Tabela 2: Medidas em cm dos úmeros de *Notiomastodon platensis* analisados neste estudo.

Espécime	Comp. Total	Larg. diáfise	Maturidade
Úmero Santa Vitória do Palmar	58,01	14,38	adulto
SGO-PV-267 (Chile)	107,74	20,60	adulto
úmero Araxá MCter 3	63,82	13,04	adulto
SGO-PV-267 (Chile)	53,63	12,53	juvenil
C4N17 (Chile)	28,19	7,29	filhote
SGO-PV — úmero juvenil 1a	50,81	13,55	juvenil
SGO-PV — úmero juvenil 1b	50,29	12,05	juvenil

O gráfico (Fig. 7) evidencia sobretudo a série ontogenética, o filhote e os juvenis são nitidamente menores que os adultos, mas o número reduzido de exemplares adultos não permite distinguir gêneros nem testar dimorfismo. Entre os adultos, o exemplar SGO-PV-267 corresponde ao maior úmero da amostra, seguindo o padrão de que os indivíduos de maior porte tendem a representar machos. Dessa forma, o úmero é apresentado de maneira estritamente descritiva, com um padrão de variação apenas sugestivo e coerente com o observado no fêmur, sem sustentar, isoladamente, uma inferência estatística de dimorfismo.

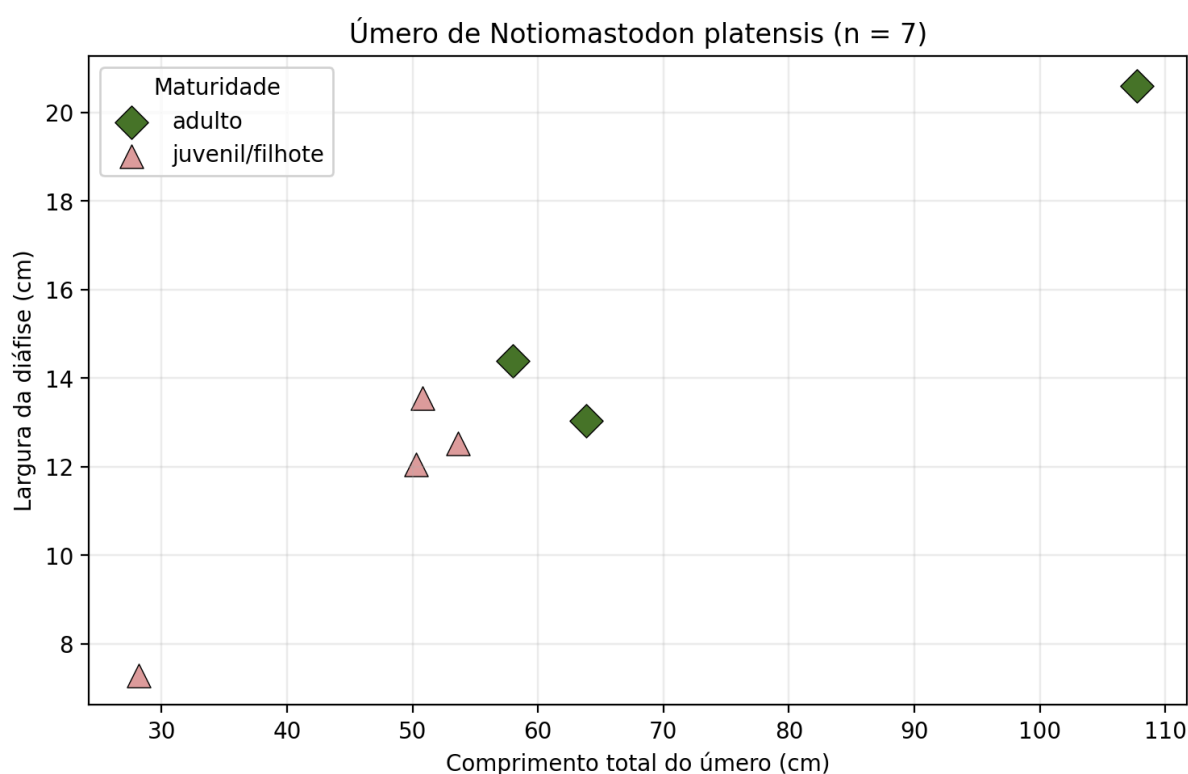


Figura 7: Gráfico de dispersão do comprimento total pela largura da diáfise dos sete úmeros de *Notiomastodon platensis*. Losangos verdes indicam indivíduos adultos, e triângulos rosa os indivíduos juvenis e imaturos (não considerados para inferência de dimorfismo sexual neste estudo).

4.3 Tíbia

Foram analisadas cinco tíbias de *Notiomastodon platensis*, todas de indivíduos adultos, com comprimentos entre aproximadamente 52 e 61 cm e larguras de diáfise entre 8 e 11 cm (Tabela 3). Observa-se uma tendência de dois exemplares maiores (Araxá MCTer e Tíbia PUC Minas) frente a três menores (Fig. 8), o que poderia acompanhar o padrão de dimorfismo verificado no fêmur, com os indivíduos maiores interpretáveis como machos. Contudo, com apenas cinco espécimes não é possível aplicar teste estatístico, de modo que o

resultado é estritamente descritivo e serve unicamente como comparação qualitativa com os demais elementos.

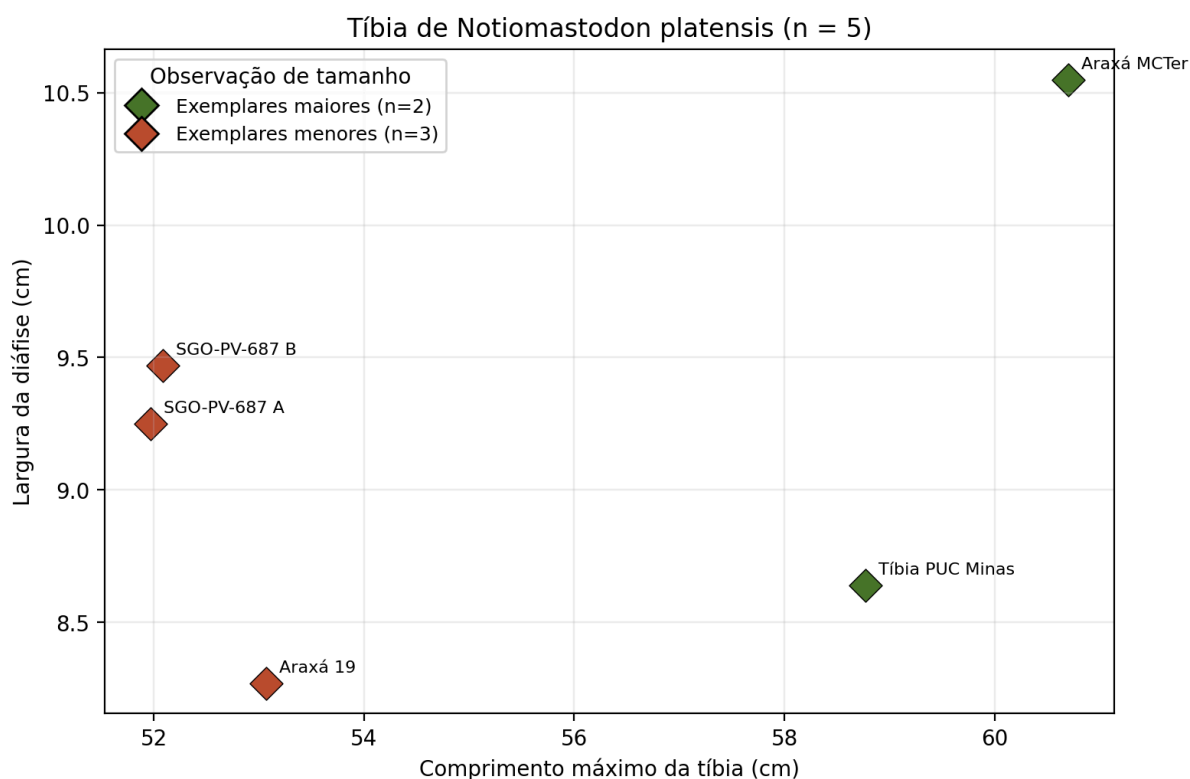


Figura 8: Distribuição dos espécimes adultos de tibia de *Notiomastodon platensis* (n = 5) em função do comprimento máximo e da largura da diáfise. Observa-se uma separação descritiva entre dois exemplares de maior porte (verde) e três exemplares de menor porte (laranja). Devido ao reduzido tamanho amostral, essa diferenciação representa apenas uma tendência morfométrica e não corresponde a agrupamentos estatisticamente testados.

Tabela 3: Medidas em cm das tíbias de *Notiomastodon platensis* analisadas neste estudo.

Espécime	Comp. total	Larg. diáfise
Araxá 19	53,07	8,27
SGO-PV-687 (Chile) A	51,97	9,25
SGO-PV-687 (Chile) B	52,09	9,47
Araxá MCTer	60,70	10,55
MCL 18.557/15	58,77	8,64

4.4 Mandíbula

As medidas morfométricas obtidas para as 17 mandíbulas analisadas estão apresentadas na Tabela 4. Foram consideradas as seguintes medidas: 1. Comprimento do côndilo até o infradentário; 3. Comprimento do infradentário até o início do ramo ascendente; 4. Comprimento do infradentário até a borda oral do segundo molar; 5. Comprimento da borda oral do segundo molar até o início do ramo ascendente; 8. Comprimento do gônio caudal até a margem anterior do ramo; 10. Altura oral do ramo (do gônio ao córion); 11. Altura aboral do ramo (do gônio ao côndilo); e 12. Altura do corpo mandibular na altura do molar.

Tabela 4: Medidas morfométricas dos ramos mandibulares de *Notiomastodon platensis* analisados neste estudo.

Espécime	1	3	4	5	8	10	11	12
01 - Águas de Araxá – dir.	63,6	37,4	34,9	16,5	19,5	25,4	41,9	13,6
02 - Águas de Araxá – esq.	59,2	36,9	33,1	16,2	19,3	23,3	39,7	14,6
03 - 1886, Uruguai	59,8	41,5	38,7	19,2	18,1	25,4	26,1	13,4
04 - EPMPV S/N, Arroio Chuí, RS	80,3	53,2	40,3	24,8	22,0	26,8	42,2	16,3
05 - MECN-133, Bolívar, Equador	81,9	50,0	44,6	18,7	24,7	28,6	44,1	15,2
06 - INGEOMINAS, Colômbia	86,7	53,8	46,1	17,9	21,8	34,0	51,5	15,3
07 - MNHN 1748, Bogotá, Colômbia	77,4	50,0	42,8	27,0	24,2	33,9	45,6	17,2
09 - MNHN 182, La Plata, Argentina	78,4	52,0	44,0	18,8	20,0	23,5	39,2	16,8
10 - V-160, Santa Elena, Equador	111,5	62,6	54,4	26,2	34,1	48,3	72,6	19,5
11 - MACN 2157, Buenos Aires, Arg.	59,2	35,2	29,3	17,2	19,9	21,3	35,7	12,1
12 - MACN 44, Buenos Aires, Arg.	73,0	39,5	35,1	14,8	20,5	33,9	46,0	17,3
13 - MACN 6068, Córdoba, Argentina	64,7	41,4	35,4	18,4	21,6	20,6	32,6	15,6

Espécime	1	3	4	5	8	10	11	12
14 - MACN 5213, Santa Fé, Argentina	82,6	45,5	40,2	17,7	23,3	27,5	46,9	16,0
15 - MLP 8-1, Arrecifes, Argentina	74,0	40,1	35,2	17,3	26,7	27,4	45,9	14,7
16 - MUSM 81, Pasamayo, Lima, Peru	78,5	53,2	42,4	17,6	18,8	31,6	40,9	13,7
17 - MUSM 83, Canta, Lima, Peru	63,7	39,5	34,2	16,0	17,2	23,2	36,8	10,9
18 - MACN 13559, Buenos Aires, Arg.	86,2	53,6	42,2	24,6	24,5	29,3	41,5	18,6

A Análise de Componentes Principais (PCA) indicou que o primeiro componente (PC1) concentra a maior parte da variação morfométrica das mandíbulas (75,0% da variância), com todas as oito medidas contribuindo no mesmo sentido e com pesos semelhantes. O PC1 corresponde, portanto, a um eixo de tamanho geral, ao longo do qual as mandíbulas se ordenam de exemplares menores a maiores. À semelhança do fêmur, é o tamanho absoluto, e não a proporção entre medidas, que domina a variação dos ramos mandibulares.

O agrupamento por *k-means* ($k = 2$) dividiu os indivíduos em dois conjuntos de porte distinto: um grupo de mandíbulas menores ($n = 8$) e outro de mandíbulas maiores ($n = 9$), distribuídos ao longo do eixo de tamanho (Fig. 9A). A princípio, essa partição é compatível com o padrão observado no fêmur, no qual os indivíduos de maior porte correspondem aos machos; sob essa leitura, trazida do fêmur, e não estabelecida pela mandíbula, o grupo maior seria compatível com machos e o menor, com fêmeas.

Essa separação, contudo, é bem menos definida que a do fêmur. Naquele elemento, os dois grupos não se sobreponham e havia uma lacuna nítida de comprimento; na mandíbula, os valores distribuem-se de forma contínua, sem descontinuidade evidente entre os conjuntos (Fig. 9B). Os testes formais confirmam esse caráter unimodal: o coeficiente de bimodalidade de *Sarle* ($b = 0,44$) situou-se abaixo do limiar de 0,555, e a comparação de modelos de mistura gaussiana por BIC favoreceu um único agrupamento em relação a dois, uma vez excluído um exemplar de porte excepcional (V-160). Ou seja, ainda que o *k-means*, forçado a

$k = 2$, sempre produza um conjunto maior e um menor, os dados não sustentam a existência de dois grupos discretos.

Outro aspecto relevante é a distribuição dos indivíduos entre os dois grupos identificados na análise. Os dois conjuntos apresentam tamanhos amostrais semelhantes (8 e 9 indivíduos), em contraste com o observado para os fêmures, nos quais os machos constituem a minoria da amostra. Uma partição próxima da metade da amostra é mais compatível com o seccionamento de uma variação contínua do tamanho mandibular do que, por si só, com a separação de dois grupos sexuais distintos. Dessa forma, a mandíbula, isoladamente, não fornece evidência conclusiva de dimorfismo sexual em *Notiomastodon platensis*, mas apresenta um padrão compatível com as inferências obtidas a partir do fêmur, atuando como evidência complementar à interpretação do dimorfismo observado na espécie.

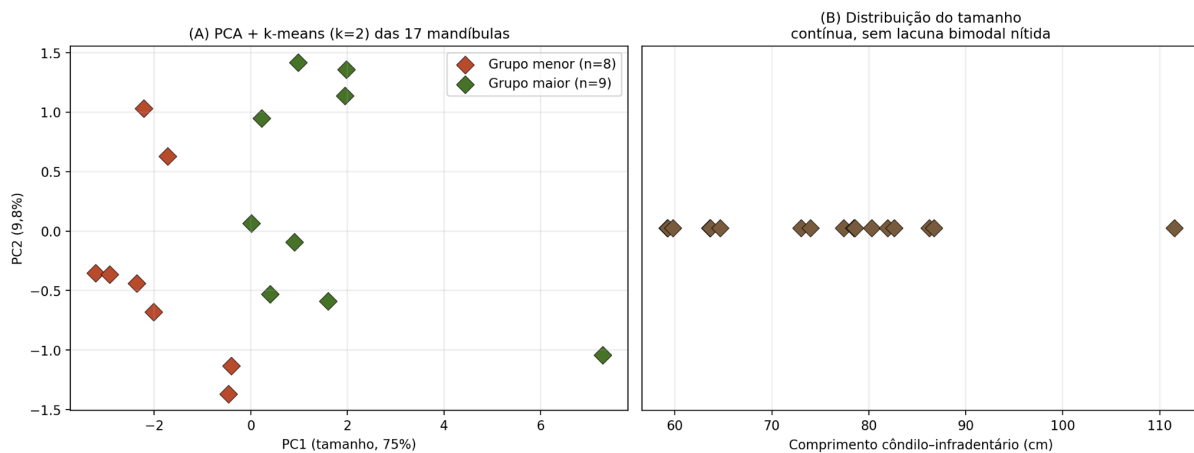


Figura 9: Análise morfológica das mandíbulas de *Notiomastodon platensis*. A) Análise de Componentes Principais das 17 mandíbulas, com os indivíduos coloridos segundo os agrupamentos do *k-means* ($k = 2$): grupo menor (vermelho) e grupo maior (verde). O PC1 corresponde ao eixo de tamanho (75% da variância). B) Distribuição do comprimento côndilo–infradentário, contínua e sem lacuna nítida entre os grupos.

4.5 O dimorfismo sexual em *Notiomastodon platensis*

Os resultados obtidos neste estudo sustentam a presença de dimorfismo sexual em *Notiomastodon platensis*, expresso sobretudo como um dimorfismo de tamanho, no qual os machos são maiores que as fêmeas. Esse padrão é congruente com o amplamente documentado para proboscídeos atuais e fósseis, nos quais os machos atingem dimensões corporais marcadamente superiores às das fêmeas (Haynes, 1991; Lee e Moss, 1995; Smith e Fisher, 2013), incluindo formas extintas com dimorfismo ainda mais acentuado, como

Palaeoloxodon antiquus (Larramendi *et al.*, 2017). Entre os elementos analisados, o fêmur forneceu o sinal mais claro e constitui a principal evidência de dimorfismo neste estudo; o úmero e a tíbia apresentaram tendência compatível, ainda que restrita pela amostragem; e a mandíbula apresentou uma variação de tamanho contínua, na qual o sinal associado ao dimorfismo sexual não pôde ser dissociado da variação ontogenética decorrente do crescimento ao longo da vida.

A análise dos fêmures sugere fortemente que a diferença nas proporções destes ossos longos em *Notiomastodon platensis*, formando dois grupos distintos em tamanho, está em conformidade com o padrão de dimorfismo sexual reconhecido para outros proboscídeos, tanto extintos quanto atuais (Haynes, 1991; Averianov, 1996; Bader *et al.*, 2024). Ressalta-se que indivíduos claramente imaturos (com epífises e diáfises de ossos longos não fusionadas, ou com cicatrizes de fusão muito profundas e evidentes) não foram incluídos nas análises morfológicas com intuito de reconhecer a presença do dimorfismo sexual, de forma que os agrupamentos identificados correspondem a variações de indivíduos adultos.

Nos fêmures, os indivíduos classificados como machos apresentaram maior comprimento total e diâmetro da diáfise, enquanto as fêmeas exibiram medidas menores, sendo cada gênero com um intervalo bem marcado e sem sobreposição, principalmente em relação ao comprimento total deste osso longo. A robustez desse resultado é reforçada pelo agrupamento não supervisionado por *k-means*, que, sem qualquer informação prévia sobre o gênero, recuperou exatamente a mesma divisão observada, indicando que a estrutura bimodal está contida nos próprios dados morfométricos, e não decorre da classificação *a priori* atribuída.

Assim, reconhece-se aqui que indivíduos adultos fêmeas de *Notiomastodon platensis* apresentariam fêmures com até aproximadamente 105 cm de comprimento, enquanto adultos machos teriam fêmures a partir de 110 cm de comprimento, podendo alcançar até 122 cm (maior fêmur analisado neste estudo, Fig. 10). Comparando-se os valores médios de cada grupo, os machos são cerca de 23% maiores que as fêmeas, com diferenças que vão de 16,2% nos limites máximos até 35,8% ao contrastar os menores espécimes de cada grupo.

Esse padrão é consistente com estudos que demonstram que machos de proboscídeos tendem a ser 17–25% maiores que fêmeas de mesma idade (Haynes, 1991), com *Notiomastodon platensis* apresentando um intervalo de variação ainda um pouco mais extenso. Essas proporções distintas entre machos e fêmeas refletem traços fundamentais da biologia e da ecologia dos proboscídeos, principalmente linhagens mais modernas com ocorrência no Quaternário (mastodontes, mamutes, elefantes e gonfotérios mais derivados

Shoshani e Tassy, 1996). A maior variabilidade dos machos no eixo da robustez reflete diretamente a seleção sexual por tamanho, já que em espécies com intensa competição entre machos e disputa com embate físico pelas fêmeas durante o período reprodutivo, o maior porte atua como vantagem competitiva, alcançando o gigantismo nos proboscídeos do Neógeno e Quaternário (Christiansen, 2004; Chelliah e Sukumar, 2013; LaDue *et al.*, 2021).

A dinâmica de crescimento entre machos e fêmeas com dimorfismo sexual expressivo reflete estratégias biológicas distintas na história de vida dos proboscídeos. Os machos apresentam crescimento contínuo mesmo após atingirem a maturidade sexual e a idade adulta, uma característica vantajosa evolutivamente, uma vez que o aumento de tamanho corporal, mesmo que lento na vida adulta, amplia a força física e o sucesso em disputas por território e fêmeas férteis (Shoshani e Tassy, 1996). Assim, machos de proboscídeos funcionam em uma zona de alta performance biomecânica, situando-se mais próximos dos limites das restrições fisiológicas da espécie (Smith e Fisher, 2013). Por outro lado, as fêmeas seguem um padrão de crescimento desacelerado após a maturidade sexual e a idade adulta, direcionando seus aportes energéticos para as demandas metabólicas associadas à gestação prolongada e ao longo período de lactação, cuidado parental e vida em grupos com dinâmica matriarcal (Vidya e Sukumar, 2005).

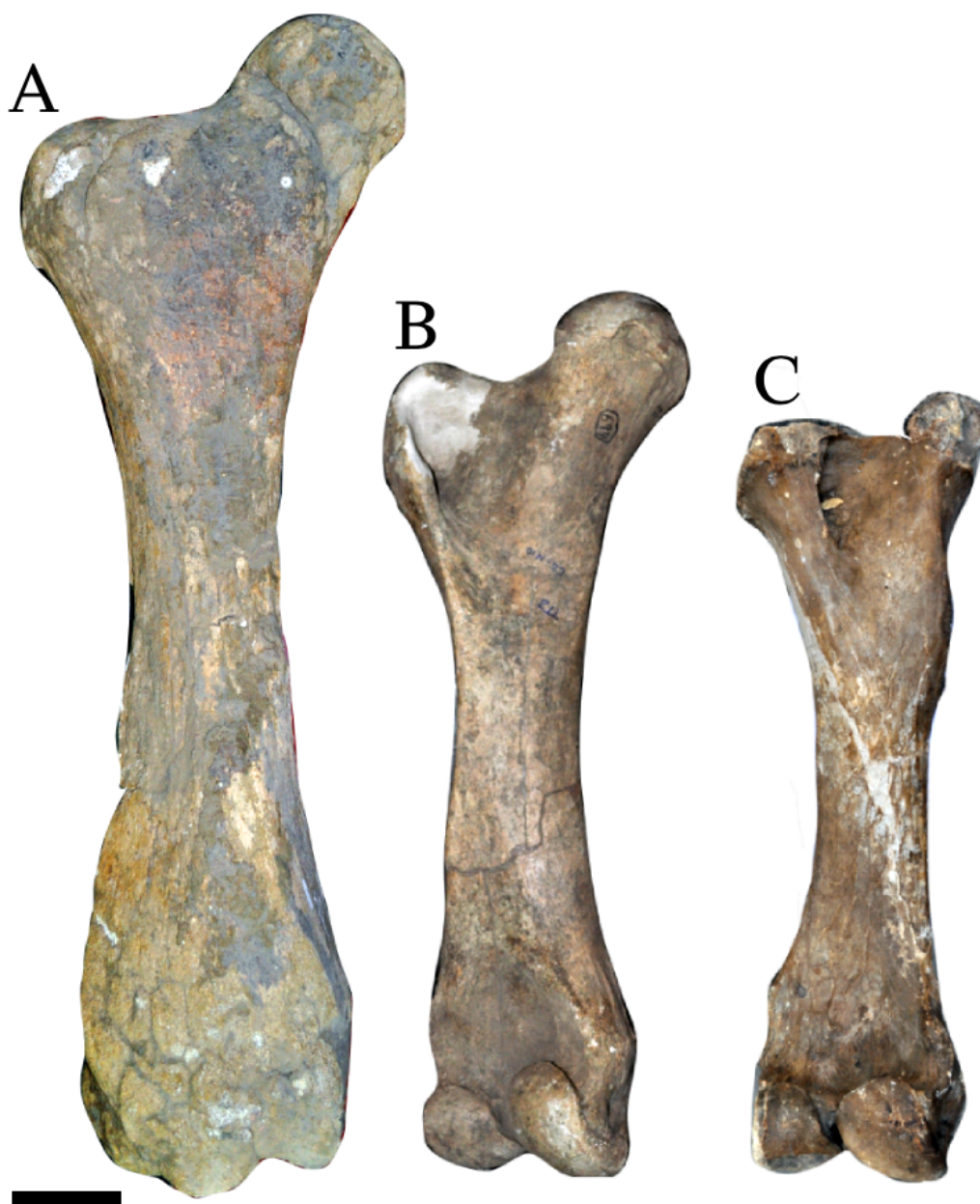


Figura 10: Dimorfismo sexual reconhecido em fêmures de *Notiomastodon platensis*. A) Macho (espécime MUSM 82); B) Fêmea (espécime SGO-PV-694); C) Possível fêmea recém-adulta (espécime DGM 20M). Escala = 10 cm

É importante ressaltar que a presença de dimorfismo sexual em proboscídeos do Quaternário também reflete a biomecânica do gigantismo nestes mamíferos (Bader *et al.*, 2023), na qual a robustez dos ossos longos não segue um padrão perfeitamente linear. Os gonfotérios, como *Notiomastodon platensis*, apresentam um morfotipo geral caracterizado por ossos proporcionalmente mais largos e diáfises amplas para dissipar forças e acomodar musculaturas potentes (morfótipo *stout*; Fig. 11), sendo proboscídeos comparativamente mais

robustos e de menor estatura que elefantes e mamutes (considerados mais longilíneos e delgados, no morfótipo *slim*).



Figura 11: Reconstrução do indivíduo mais completo de *Notiomastodon platensis*, proveniente do Equador, reconhecido neste estudo como uma fêmea adulta (24-34 anos; fêmures MECN 98 e MECN 420), descrita originalmente por Ferretti (2010). O indivíduo original apresenta uma série de deformidades tafonômicas, principalmente no crânio.

Desta forma, as medidas dos fêmures utilizadas neste estudo representam um sinal morfológico adaptativo e intrínseco destas linhagens, evidenciando que o investimento na dimensão transversal da diáfise nos machos de *Notiomastodon platensis* responde às exigências extremas de desempenho e suporte de massa corporal, que difere estruturalmente da silhueta mais delgada e da amplitude longitudinal observada entre as fêmeas. A semelhança de padrões morfológicos entre espécies filogeneticamente distantes de proboscídeos sugere que o dimorfismo sexual neste grupo é um traço bem conservado, possivelmente uma consequência do gigantismo, estratégias reprodutivas, competição intrasexual e longevidade dos indivíduos (Shoshani e Tassy, 1996; LaDue *et al.*, 2021).

Segundo Haynes (1991), o grau de dimorfismo sexual em elefantes modernos é semelhante ao observado em mamutes e mastodontes, sendo especialmente evidente no tamanho do fêmur e no volume das defesas. Além disso, o crescimento prolongado dos machos pode ser evidenciado pela presença de epífises com funcionamento mais lento nos ossos longos, que podem persistir por vários anos após a fusão ocorrida nas fêmeas (Roth,

1984). Desta forma, é possível haver indivíduos machos adultos que apresentam cicatrizes de fuscionamento de ossos longos que, por esta razão, podem ser confundidos com indivíduos jovens, ainda em amadurecimento. Entretanto, neste estudo, utilizamos somente espécimes de ossos longos que seguramente apresentavam epífises bem fusionadas, representando adultos maduros, e um estudo incluindo espécimes em outros estágios de fuscionamento das epífises pode ser realizado no futuro.

Os espécimes analisados abrangem uma ampla distribuição geográfica, por toda América do Sul, e temporal, desde o Pleistoceno Médio até o Holoceno Inicial, indicando que o dimorfismo sexual observado não está restrito a uma única população ou período. A ausência de correlação entre variações morfológicas e localidades de origem dos materiais sugere que as diferenças não são influenciadas por fatores geográficos ou ambientais, mas sim por variações intrínsecas à espécie.

O úmero e a tíbia, embora mensurados seguindo o mesmo protocolo, foram limitados pelo reduzido número de exemplares adultos disponíveis, restrição de natureza tafonômica, e não amostral, dada a escassez de ossos longos completos e não deformados nas coleções. Por isso, foram tratados de forma descritiva, apresentando variação de tamanho e robustez compatível com a tendência observada no fêmur, porém sem permitir teste estatístico. Ainda assim, sua inclusão justifica-se: tratam-se de ossos longos submetidos a pressões funcionais semelhantes às do fêmur e, portanto, potencialmente informativos quando ampliada a amostragem. A baixa representatividade desses elementos limita análises estatísticas mais robustas, mas as tendências observadas são coerentes com o quadro geral de dimorfismo de tamanho.

A mandíbula, ao contrário do fêmur, não apresentou separação bimodal. Embora o *k-means* ($k = 2$) tenha particionado a amostra em um grupo de menor e outro de maior tamanho ao longo do eixo representado pelo PC1 (que concentra a maior parte da variância e apresenta cargas positivas para todas as medidas), a distribuição dos indivíduos mostrou-se estatisticamente unimodal, não sustentando a existência de dois agrupamentos discretos. O particionamento aparentemente equilibrado produzido pelo *k-means* decorre do algoritmo dividir uma variação contínua de tamanho, e não do reconhecimento de dois agrupamentos reais, leitura reforçada pelo contraste com a proporção de gêneros recuperada no fêmur, na qual os machos constituem uma minoria da amostra, e não metade dela.

Ressalta-se, contudo, que a ausência de uma distribuição bimodal não implica necessariamente ausência de dimorfismo sexual. Em *Mammuthus primigenius*, a mandíbula apresenta alterações de tamanho relacionadas à ontogenia, enquanto o dimorfismo sexual

nesse elemento é considerado discreto, tornando a idade um importante fator de confusão para sua identificação (Álvarez-Lao e Méndez, 2011).

Nesse sentido, a distribuição contínua observada nas mandíbulas de *Notiomastodon platensis* pode refletir a sobreposição entre a variação ontogenética e aquela potencialmente associada ao gênero. Embora a PCA tenha demonstrado que o tamanho geral constitui o principal eixo de variação mandibular, não foi possível isolar com segurança o componente sexual a partir das variáveis analisadas. Dessa forma, a mandíbula, isoladamente, não fornece evidência conclusiva de dimorfismo sexual, sendo interpretada como evidência complementar ao padrão observado no fêmur, que apresentou a separação mais clara entre os grupos neste estudo.

Ainda assim, algumas limitações metodológicas relativas à interpretação do dimorfismo sexual em *Notiomastodon platensis* devem ser consideradas. A atribuição sexual foi realizada com base no porte dos espécimes, seguindo o padrão descrito na literatura para outros proboscídeos, constituindo uma inferência morfométrica e não uma determinação direta por tecidos moles ou genética. Nesse contexto, a análise de agrupamento não supervisionado desempenhou um papel fundamental ao demonstrar que a separação bimodal observada no fêmur emerge intrinsecamente dos dados morfométricos, de forma independente de classificações prévias.

Enquanto estudos com elefantes modernos utilizam parâmetros corporais diretos de indivíduos vivos (como altura do ombro ou morfologia pélvica; Lee e Moss, 1995; Shrader *et al.*, 2006) e pesquisas com mamutes recorrem a marcadores genéticos moleculares (Moots *et al.*, 2026), o registro fóssil de *Notiomastodon* demanda abordagens baseadas em elementos esqueléticos isolados, já que raros são os indivíduos mais completos, com fósseis associados (Ferretti, 2010; Carrilho-Briceño *et al.*, 2026), tornando a morfometria multivariada a ferramenta mais adequada para reconhecer o dimorfismo sexual neste proboscídeo.

4.6 Implicações paleoecológicas do dimorfismo sexual em *Notiomastodon platensis*

O reconhecimento de dimorfismo sexual em *Notiomastodon platensis*, mesmo que evidenciado por poucos elementos esqueléticos, têm implicações importantes para a compreensão de sua paleobiologia e interpretações de dados paleoecológicos, migratórios, e de comportamento. A segregação de habitat entre machos e fêmeas, comum em grupos de elefantes modernos (Moss, 2001) e extintos (Bibi *et al.*, 2012), é esperada para populações de

linhagens extintas, pode ser corroborada morfometricamente em *Notiomastodon platensis*. A exemplo, a assembleia de mastodontes de Araxá, MG, descrita inicialmente por Simpson e Paula-Couto (1957) e estudada mais recentemente por outros autores (Dominato *et al.*, 2009; 2011; Mothé *et al.*, 2010; Asevedo *et al.*, 2012; Avilla *et al.*, 2013), teve três de seus indivíduos identificados aqui como sendo um macho (espécime Fêmur SN 2 na Tabela 1) e duas fêmeas (espécimes DGM 20M e Fêmur SN 1 na Tabela 1), ainda com essas duas fêmeas apresentando diferentes proporções.

A co-ocorrência de machos e fêmeas adultos reforça a hipótese de que o depósito datado do Pleistoceno tardio (66~60 mil anos atrás, Avilla *et al.*, 2013), associado a fontes minerais, funcionava como um refúgio hídrico sazonal (Mothé *et al.*, 2010). Tal aglomeração multissexual reflete o comportamento de resposta a gargalos ambientais severos, análogo ao documentado para elefantes sob estresse hídrico e climático (Lee *et al.*, 2022). Por outro lado, a presença de machos e fêmeas adultos nesta assembleia pode também representar algum tipo de mistura temporal/espacial dos materiais encontrados no depósito, com diferentes momentos de processos tafonômicos, como morte, decomposição, transporte e soterramento (Dominato *et al.*, 2009; 2011; Avilla *et al.*, 2013).

Embora os padrões de dieta previamente reconhecidos para a população de Araxá, MG, baseados em análises de microdesgaste e microfósseis vegetais de cálculo dentário e variação entre classes etárias (Asevedo *et al.*, 2012), indiquem uma estratégia de alimentação generalista com consumo de folhas C3 e elementos lenhosos para *Notiomastodon platensis*, a confirmação da presença de ambos os sexos na assembleia fossilífera abre espaço para investigações mais refinadas sobre possíveis diferenças tróficas intraespecíficas. Contudo, a ausência de associação direta entre os elementos dentários analisados por Asevedo *et al.* (2012) e o material de mandíbulas e elementos pós-cranianos limita a correlação segura entre os hábitos alimentares específicos e a identificação sexual dos espécimes desta população de mastodontes.

A identificação sexual em *Notiomastodon platensis* traz implicações diretas para o refinamento de estudos de paleodieta de forma mais ampla, como aqueles baseados em análises isotópicas (Dantas *et al.*, 2017; 2020). Tradicionalmente, variações nas assinaturas isotópicas são interpretadas quase exclusivamente sob a ótica de mudanças climáticas, sazonalidade ou variações regionais na cobertura vegetal. No entanto, à luz do comportamento de proboscídeos modernos, onde machos solitários e grupos matriarcais de fêmeas frequentemente diferem no uso do hábitat e na amplitude de deslocamento

diário/sazonal (Haynes, 1991; Lee e Moss, 2001; Lee *et al.*, 2022), parte dessa dispersão nos dados isotópicos pode refletir segregação trófica e espacial entre os gêneros.

Considerar o dimorfismo sexual nas análises de isótopos pode auxiliar a evitar vieses de interpretação, permitindo discernir se as flutuações na dieta decorrem de pressões ambientais externas ou de estratégias ecológicas distintas associadas ao gênero nestes proboscídeos. Em grandes mamíferos atuais com forte dimorfismo sexual (como elefantes africanos), machos e fêmeas frequentemente apresentam diferenças na seleção de hábitat e na dieta. Machos solitários (maiores e mais pesados) podem explorar vegetações mais densas ou de menor qualidade nutricional em áreas marginais devido às suas exigências energéticas massivas, enquanto fêmeas com filhotes tendem a ocupar áreas com recursos mais seguros e de alta qualidade. No caso do *Notiomastodon*, a grande disparidade de porte sugere que machos e fêmeas podiam exercer pressões ecológicas distintas sobre a paisagem.

Espécies caracterizadas por dimorfismo sexual acentuado, gigantismo e crescimento contínuo, além de estratégias de vida do tipo K, fundamentadas em longos períodos de gestação, lactação prolongada e investimento parental intensivo, invariavelmente apresentam taxas reprodutivas baixas e tempos de geração longos (Lee *et al.*, 2022). No contexto paleobiológico de proboscídeos como o *Notiomastodon platensis*, estes aspectos trazem uma vulnerabilidade intrínseca frente a rápidas flutuações ambientais e pressões antrópicas e/ou climáticas do final do Pleistoceno (Mothé *et al.*, 2017, 2020; Araújo *et al.*, 2021; Cruz *et al.*, 2026). Nos machos, esta vulnerabilidade manifesta-se nas exigências metabólicas extremas (portes gigante e crescimento contínuo), focadas na competição reprodutiva, que demandam imensos recursos tróficos de alta qualidade e os tornam sensíveis a quebras na produtividade primária (LaDue *et al.*, 2021). Já nas fêmeas, o ciclo reprodutivo com longo intervalo entre gestações e longo período de cuidado parental/lactação limita drasticamente a capacidade da população de repor perdas demográficas em curto prazo (Shoshani e Tassy, 1996; Lee *et al.*, 2022).

Ainda, reconhece-se aqui que, entre os indivíduos fêmeas representados por fêmures (N total = 17), cinco são provenientes de sítios paleoarqueológicos de idade na transição Pleistoceno-Holoceno (Tagua Tagua, no Chile, e Taima Taima, na Venezuela), sendo eles SGO-PV-694, SGO-PV-241, C2H26, CIAPP-312 e CIAAP-111 (Labarca *et al.*, 2020; Carrillo-Briceño *et al.*, 2026). A representatividade e a variação morfométrica observadas nessas fêmeas trazem implicações profundas para a compreensão da paleobiologia de *Notiomastodon platensis* e seu processo de extinção no Quaternário, além das interações zooantropológicas.

Do ponto de vista morfométrico, há uma amplitude considerável de comprimento femoral no grupo feminino, de 82 cm até quase 99 cm, demonstrando que o conjunto de fêmeas presentes nesses depósitos abrange desde indivíduos adultos menores (e possivelmente adultas no auge reprodutivo) até fêmeas plenamente desenvolvidas e senis. Destaca-se, nesse grupo, o espécime CIAAP-111, com 99,25 cm de comprimento e largura de diáfise relativamente estreita (11,89 cm), que possui material dentário associado (terceiros molares bastante desgastados) e idade estimada de 47 a 53 anos, exibindo assim características morfométricas típicas de adulto senil, e sendo possivelmente uma matriarca de bando. Essa variabilidade indica que a estrutura demográfica representada nesses sítios não se restringia a uma única faixa etária, englobando fêmeas de diferentes fases da vida reprodutiva (Mothé *et al.*, 2010; Carrillo-Briceño *et al.*, 2026).

Essa presença relevante de fêmeas em contextos arqueológicos afeta diretamente as hipóteses de interação entre humanos e a megafauna. Estima-se que proboscídeos do Quaternário, como *Notiomastodon platensis*, se organizariam em grupos matriarcais, nas quais fêmeas mais jovens e filhotes dependeriam estritamente de refúgios hídricos e tróficos conhecidos pelas fêmeas mais velhas, e esses locais funcionariam como pontos de convergência previsíveis (Haynes, 1991; Lee e Moss, 1995; Moss, 2001). Para os grupos humanos antigos, monitorar ou emboscar tais refúgios facilitava a captura preferencial de grupos familiares dotados de alta fidelidade espacial e menor capacidade de dispersão rápida, em contraste com os machos solitários e nômades.

Ainda, a predação de fêmeas reprodutivas adultas de uma espécie já afetada pelas mudanças climático-ambientais do Pleistoceno tardio constitui um impacto severo para a sobrevivência da espécie (Cione *et al.*, 2003; Araújo *et al.*, 2021). A perda de fêmeas reprodutivas e de líderes de manada reduz drasticamente o tamanho efetivo populacional, acelerando o colapso rumo à extinção da espécie. Por fim, a concentração de fêmeas adultas de diversos portes (como os fêmures entre 84 cm e 99 cm) pode refletir uma estratégia de caça otimizada, na qual animais que se deslocavam em bandos familiares ofereciam retorno calórico previsível e menor imprevisibilidade comportamental do que os machos solitários (Prates *et al.*, 2025).

Desta forma, o reconhecimento do dimorfismo sexual em fósseis de *Notiomastodon* permite refinar a compreensão do perfil demográfico preferencialmente caçado/predado por grupos humanos na transição Pleistoceno/Holoceno. Os dados evidenciam que as fêmeas reprodutivas e líderes de manada constituíam um segmento vulnerável da estrutura populacional, complementando o registro de indivíduos imaturos em sítios arqueológicos

(Mothé *et al.*, 2020; Labarca *et al.*, 2020; Carrillo-Briceño *et al.*, 2026). A remoção direcionada dessas fêmeas enquanto alvos altamente previsíveis em refúgios hídricos durante as crises climáticas do Quaternário corrobora diretamente a hipótese do *Broken Zig-Zag* (Cione *et al.*, 2003): a expansão humana na transição Pleistoceno-Holoceno incidiu justamente sobre a retração e menor biomassa populacional induzido pelas oscilações ambientais, quebrando o ciclo natural de recuperação das populações (principalmente aquelas com estratégia K) e potencialmente conduzindo *Notiomastodon platensis* à extinção (Mothé *et al.*, 2020; Araújo *et al.*, 2021).

5. DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA E POPULARIZAÇÃO DA CIÊNCIA

A divulgação científica é essencial para aproximar o conhecimento acadêmico da sociedade. No caso da paleontologia, essa prática é ainda mais relevante, pois a área é pouco explorada no ensino básico e muitas vezes ausente dos currículos oficiais (Godoi *et al.*, 2022). A popularização da ciência contribui para democratizar o acesso ao conhecimento, despertar vocações científicas e ampliar a valorização do patrimônio fossilífero brasileiro (Silva, 2025; Azevedo *et al.*, 2024).

Neste trabalho, a primeira proposta de divulgação científica consistiu na produção de conteúdos acessíveis no Instagram do Grupo de Estudos em Megafauna (@gem_unirio), voltados ao público não especializado. Os posts foram elaborados com linguagem clara, visual atrativo e foco em temas como megafauna sul-americana, métodos de estudo e curiosidades paleobiológicas. O uso das mídias digitais como ferramenta de popularização da ciência tem se mostrado eficaz para alcançar públicos diversos, especialmente jovens, que consomem informação majoritariamente em plataformas digitais (Melo *et al.*, 2007). Posts com o resultado e interpretação deste estudo estão programados para serem divulgados após a defesa da dissertação.

Além disso, foi ofertada uma disciplina de Introdução à Paleontologia em uma escola estadual da zona rural do Ceará, onde atuo como professora de Biologia no ensino médio (Fig. 12). A proposta buscou desmistificar a paleontologia e despertar o interesse dos alunos pela área, com foco na paleontologia cearense (Scarpeline *et al.*, 2025).

Foram abordados temas como a Chapada do Araripe, a megafauna extinta e os métodos de pesquisa paleontológica. A abordagem foi lúdica e envolveu oficinas de réplicas de fósseis confeccionadas em gesso, visitas virtuais a museus, especialmente relevantes para alunos que nunca tiveram essa oportunidade e a exibição do filme A Era do Gelo, seguida da identificação e discussão dos animais da megafauna presentes na animação. Essa experiência dialoga com propostas pedagógicas que defendem o uso de recursos visuais, atividades práticas e contextualização regional como estratégias para aproximar os estudantes da paleontologia (Silva, 2025; Godoi *et al.*, 2022; Azevedo *et al.*, 2024).

A prática demonstrou que a paleontologia pode ser um recurso didático poderoso para despertar o interesse dos alunos pela ciência, especialmente em contextos de vulnerabilidade social e cultural, como escolas da zona rural. A escassez de acesso a museus e espaços culturais torna ainda mais relevante a adoção de metodologias alternativas, que proporcionem vivências significativas e aproximem os estudantes da realidade científica. Nesse sentido, a

divulgação científica realizada durante o mestrado não apenas atendeu a uma exigência acadêmica, mas também cumpriu uma função social, contribuindo para a formação crítica e científica dos alunos e para a valorização do patrimônio paleontológico brasileiro.



Figura 12: Atividade prática da disciplina de Introdução à Paleontologia para Ensino Médio, com aplicação de conceitos de anatomia, morfologia, biodiversidade, evolução e paleoecologia.

6. CONCLUSÃO

O presente estudo constitui a primeira abordagem voltada ao reconhecimento do dimorfismo sexual em *Notiomastodon platensis*, preenchendo uma lacuna relevante no conhecimento sobre a biologia populacional desse proboscídeo, um dos megamamíferos mais representativo da fauna quaternária da América do Sul.

A análise morfométrica de 52 espécimes (fêmures, úmeros, tíbias e mandíbulas) provenientes de oito países e de um amplo intervalo temporal (Pleistoceno médio/tardio ao Holoceno inicial) permitiu identificar, de forma consistente, dois agrupamentos morfológicos distintos tanto nos fêmures quanto nas mandíbulas, quando submetidos às técnicas de agrupamento não supervisionado (k-means) e, no caso das mandíbulas, à Análise de Componentes Principais (PCA). Esses agrupamentos, caracterizados por diferenças de tamanho e robustez, foram interpretados como reflexo de dimorfismo sexual, e não de variação geográfica, temporal ou etária, uma vez que: (i) a exclusão prévia de indivíduos imaturos eliminou o efeito de variação ontogenética; (ii) a dispersão dos espécimes de uma mesma localidade entre os dois grupos afastou a hipótese de determinismo geográfico; e (iii) a ampla distribuição temporal da amostra indica que o padrão não está restrito a uma população ou momento específico da história da espécie.

Dessa forma, a hipótese principal do trabalho, a existência de padrões morfológicos de dimorfismo sexual em *Notiomastodon platensis* que extrapolam a variação individual, temporal e regional, foi corroborada pelos dados obtidos. O grupo de maior porte e robustez, tanto em elementos apendiculares quanto na mandíbula, foi interpretado como composto por machos adultos, enquanto o grupo de porte intermediário foi associado a fêmeas adultas, em conformidade com o padrão amplamente documentado para outros proboscídeos, fósseis e viventes (mamutes, mastodontes e elefantes), nos quais os machos atingem maior tamanho corporal em razão do crescimento contínuo ao longo da vida e da maturidade sexual mais tardia, além da seleção sexual nas linhagens.

É importante reconhecer, contudo, as limitações do estudo. A reduzida amostragem de úmeros e tíbias, decorrente de fatores tafonômicos e de preservação, e não de uma limitação amostral planejada, não permitiu análises estatísticas multivariadas profundas para esses elementos, que foram tratados como complementares às inferências obtidas a partir do fêmur. Da mesma forma, a ausência de valores de referência prévios e materiais em associação (indivíduos mais completos) publicados para a espécie impediu a aplicação de testes de hipótese paramétricos, de modo que as interpretações aqui apresentadas têm caráter

exploratório e devem ser futuramente testadas e refinadas com amostras maiores e com a incorporação de outras fontes de evidência, como medidas dentárias, incisivos hipertrofiados, a vértebra atlas e dados de histologia óssea.

Ainda assim, os resultados obtidos têm implicações relevantes para a compreensão da paleobiologia de *Notiomastodon platensis*, abrindo caminho para investigações futuras sobre estrutura populacional, composição de manadas, viés de paleodieta, e possível segregação de habitat entre machos e fêmeas, fenômeno bem documentado em elefantes atuais, e sobre o papel dessas variáveis nos processos que levaram à extinção da espécie no final do Pleistoceno e início do Holoceno.

Por fim, este trabalho reforça a universalidade do dimorfismo sexual como traço conservado na ordem Proboscidea, evidenciando que espécies filogeneticamente distantes compartilham estratégias reprodutivas semelhantes, provavelmente associadas à competição intrasexual entre machos. Para além da contribuição científica, as ações de divulgação realizadas ao longo do mestrado, nas redes sociais e em sala de aula, em contexto de vulnerabilidade social e cultural, reafirmam o compromisso deste trabalho com a democratização do conhecimento paleontológico e com a valorização do patrimônio fossilífero sul-americano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADISAJJANA, A. D.; YUDHA, D. S. Mandibular Characteristics to Determine Quaternary Proboscideans of Indonesia. **Journal of Tropical Biodiversity and Biotechnology**, v. 10, n. 2, 2025.

ALBERDI, M. T.; PRADO, J. L. Diversity of the fossil gomphotheres from South America. **Historical Biology**, v. 34, n. 8, p. 1685-1691, 2022.

ÁLVAREZ-LAO, D. J.; MÉNDEZ, M. Mudanças ontogenéticas e dimorfismo sexual na mandíbula de mamutes-lanudos adultos (*Mammuthus primigenius*). **Geobios**, v. 44, n. 4, p. 335-343, 2011.

ARAÚJO, T. *et al.* Species distribution modeling reveals the ecological niche of extinct megafauna from South America. **Quaternary Research**, p. 1-8, 2021.

ARAÚJO-JÚNIOR, H. I.; PORPINO, K. O.; BERGQVIST, L. P. Marcas de dentes de carnívoros/carniceiros em mamíferos pleistocênicos do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Paleontologia**, v. 14, n. 3, p. 292, 2011.

ASEVEDO, L. *et al.* Ancient diet of the Pleistocene gomphothere *Notiomastodon platensis* (Mammalia, Proboscidea, Gomphotheriidae) from lowland mid-latitudes of South America: Stereomicrowear and tooth calculus analyses combined. **Quaternary International**, v. 255, p. 42-52, 2012.

AVILLA, Leonardo *et al.* Extinction of a gomphothere population from southeastern Brazil: taphonomic, paleoecological and chronological remarks. **Quaternary International**, v. 305, p. 85-90, 2013.

AVERIANOV, A. O. Sexual dimorphism in the mammoth skull, teeth, and long bones. In: SHOSHANI, J.; TASSY, P. (Ed.). **The Proboscidea: Evolution and palaeoecology of elephants and their relatives**. Oxford: Oxford University Press, 1996. p. 260-269.

AZEVEDO, H. J. C. C. *et al.* Paleontologia como ferramenta pedagógica: integrando ciência e alfabetização no Ensino Fundamental I. **Terrae Didatica**, v. 20, p. e024038, 2024.

BADER, C. *et al.* Diversity of limb long bone morphology among proboscideans: how to be the biggest one in the family. **Papers in Palaeontology**, v. 10, n. 6, p. e1597, 2024.

BADER, C.; DELAPRÉ, A.; HOUSSAYE, A. Shape variation in the limb long bones of modern elephants reveals adaptations to body mass and habitat. **Journal of Anatomy**, v. 242, n. 5, p. 806-830, 2023.

BALEKA, S. *et al.* Revisiting proboscidean phylogeny and evolution through total evidence and palaeogenetic analyses including *Notiomastodon* ancient DNA. **iScience**, v. 25, n. 1, p. 103559, 2022.

BARBOSA, F. H. *et al.* Osteological diseases in an extinct *Notiomastodon* (Mammalia, Proboscidea) population from the Late Pleistocene of Brazil. **Quaternary International**, v. 443, p. 228-232, 2017.

BELYAEV, Ruslan I. *et al.* Comparative study of the body proportions in Elephantidae and other large herbivorous mammals. **Journal of Anatomy**, v. 246, n. 1, p. 63-85, 2025.

BIBI, F. *et al.* Early evidence for complex social structure in Proboscidea from a late Miocene trackway site in the United Arab Emirates. **Biology Letters**, v. 8, n. 4, p. 670-673, 2012.

CARRILLO-BRICEÑO, J. D. *et al.* Diverse megamammals exploited by humans, chronology and palaeoecology at Taima-Taima, Late Pleistocene, South America. **Quaternary Science Reviews**, v. 352, p. 108745, 2026.

CIONE, A. L.; TONNI, E. P.; SOIBELZON, L. H. The broken zig-zag: Late Cenozoic large mammal and tortoise extinction in South America. **Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales**, v. 5, n. 2, p. 271-280, 2003.

CHELLIAH, Karpagam; SUKUMAR, Raman. The role of tusks, musth and body size in male–male competition among Asian elephants, *Elephas maximus*. **Animal Behaviour**, v. 86, n. 6, p. 1207-1214, 2013.

CHRISTIANSEN, Per. Body size in proboscideans, with notes on elephant metabolism. **Zoological journal of the Linnean Society**, v. 140, n. 4, p. 523-549, 2004.

CRUZ, E. N. S. *et al.* Investigation of the migratory behavior of *Notiomastodon platensis* (Gomphotheriidae, Proboscidea) in northeastern Brazil during the late Pleistocene based on radiogenic and stable isotope ratios ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$, and $\delta^{18}\text{O}$). **Quaternary Science Reviews**, v. 387, p. 110027, 2026.

- DANTAS, M. A. T. et al. Annual isotopic diet ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) of *Notiomastodon platensis*(Ameghino, 1888) from Brazilian intertropical region. **Quaternary International**, v. 610, p. 38-43, 2022.
- DANTAS, M. A. T. et al. Isotopic paleoecology ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) of a late Pleistocene vertebrate community from the Brazilian Intertropical Region. **Revista Brasileira de Paleontologia**, v. 23, n. 1, p. 55-68, 2020.
- DANTAS, M. A. T. et al. Isotopic paleoecology of the Pleistocene megamammals from the Brazilian Intertropical Region: Feeding ecology ($\delta^{13}\text{C}$), niche breadth and overlap. **Quaternary Science Reviews**, v. 170, p. 152-163, 2017.
- DING, C.; HE, X. K-means clustering via principal component analysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINE LEARNING, 21., 2004, Banff. **Proceedings...** Banff, Canada: ACM, 2004. p. 29-36.
- DOMINATO, V. H. et al. Ação de insetos em vértebras de *Stegomastodon waringi* (Mammalia, Gomphotheriidae) do Pleistoceno de Águas de Araxá, Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Paleontologia**, v. 12, n. 1, p. 77-82, 2009.
- DOMINATO, V. H. et al. Evidence of scavenging on remains of the gomphothere *Haplomastodon waringi*(Proboscidea: Mammalia) from the Pleistocene of Brazil: Taphonomic and paleoecological remarks. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 31, n. 2-3, p. 171-177, 2011.
- FARIA, F. H. C. et al. Holocene megafauna in Brazil: new records in Itapipoca (Ceará) and Miranda (Mato Grosso do Sul). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA DE VERTEBRADOS, 12., 2023, Santa Maria. **Boletim de Resumos...** Santa Maria: SBPV, 2023.
- FERRETTI, M. P. A review of South American proboscideans. **New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin**, v. 44, p. 381-391, 2008.
- FERRETTI, M. P. Anatomy of *Haplomastodon chimborazi* (Mammalia, Proboscidea) from the late Pleistocene of Ecuador and its bearing on the phylogeny and systematics of South American gomphotheres. **Geodiversitas**, v. 32, n. 4, p. 663-721, 2010.
- GODOI, P. et al. A Paleontologia na educação básica brasileira: uma revisão. **Terrae**

Didactica, v. 18, p. e022023, 2022.

GONZÁLEZ-GUARDA, E. et al. Multiproxy evidence for leaf-browsing and closed habitats in extinct proboscideans (Mammalia, Proboscidea) from Central Chile. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 115, n. 37, p. 9258-9263, 2018.

GONZÁLEZ-GUARDA, E. et al. The extinct *Notiomastodon platensis* (Proboscidea, Gomphotheriidae) inhabited mediterranean ecosystems during the Late Pleistocene in north-central Chile (31° S–36° S). **Quaternary Science Reviews**, v. 344, p. 108957, 2024.

HAYNES, G. **Mammoths, mastodonts, and elephants: biology, behavior and the fossil record**. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.

HUTTUNEN, K.; GÖHLICH, U. B. A partial skeleton of *Prodeinotherium bavaricum* (Proboscidea, Mammalia) from the middle miocene of Unterzolling (Upper Freshwater Molasse, Germany). **Geobios**, v. 35, n. 4, p. 489-514, 2002.

JOLLIFFE, I. T.; CADIMA, J. Principal component analysis: a review and recent developments. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 374, n. 2065, p. 20150202, 2016.

LABARCA, R. et al. Taguatagua 1: New insights into the late Pleistocene fauna, paleoenvironment, and human subsistence in a unique lacustrine context in central Chile. **Quaternary Science Reviews**, v. 238, p. 106282, 2020.

LADUE, C. A. et al. Musth and sexual selection in elephants: a review of signalling properties and potential fitness consequences. **Behaviour**, v. 159, n. 3-4, p. 207-242, 2021.

LARRAMENDI, A.; PALOMBO, M. R.; MARANO, F. Reconstructing the life appearance of a Pleistocene giant: size, shape, sexual dimorphism and ontogeny of *Palaeoloxodon antiquus* (Proboscidea: Elephantidae) from Neumark-Nord 1 (Germany). **Bollettino della Società Paleontologica Italiana**, v. 56, n. 3, p. 303-314, 2017.

LEE, P. C.; MOSS, C. J. Statural growth in known-age African elephants (*Loxodonta africana*). **Journal of Zoology**, v. 236, n. 1, p. 29-41, 1995.

LEE, P. C. et al. Cohort consequences of drought and family disruption for male and female African elephants. **Behavioral Ecology**, v. 33, n. 2, p. 408-418, 2022.

- LUCAS, S. G.; YUAN, W.; MIN, L. The palaeobiogeography of South American gomphotheres. **Journal of Palaeogeography**, v. 2, n. 1, p. 19-40, 2013.
- MELO, D. J. et al. Desenvolvimento de atividade lúdica para o auxílio do ensino e divulgação científica da paleontologia. **Anais do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 30, n. 1, p. 73-76, 2007.
- MOOTS, H. M. et al. Paleogenomic sex inference of mammoth remains sheds light on the anthropogenic nature of bone accumulations. **Current Biology**, 2026. (*No prelo/Ahead of print*).
- MOSS, C. J. The demography of an African elephant (*Loxodonta africana*) population in Amboseli, Kenya. **Journal of Zoology**, v. 255, n. 2, p. 145-156, 2001.
- MOTHÉ, D. et al. An artifact embedded in an extinct proboscidean sheds new light on human-megafaunal interactions in the Quaternary of South America. **Quaternary Science Reviews**, v. 229, p. 106125, 2020.
- MOTHÉ, D. et al. Sixty years after ‘The mastodonts of Brazil’: The state of the art of South American proboscideans (Proboscidea, Gomphotheriidae). **Quaternary International**, v. 443, p. 52-64, 2017.
- MOTHÉ, D. et al. Ain’t no mountain high enough? New records of *Notiomastodon platensis* (Mammalia, Proboscidea) from Colombia and the Quaternary dry corridor of the Cauca valley. **Historical Biology**, v. 36, n. 2, p. 241-252, 2024.
- MOTHÉ, D. et al. Taxonomic revision of the Quaternary gomphotheres (Mammalia: Proboscidea: Gomphotheriidae) from the South American lowlands. **Quaternary International**, v. 276, p. 2-7, 2012.
- MOTHÉ, D. et al. Doing the Time Warp again: Electron Spin Resonance dating reveals oldest numeric age for *Notiomastodon platensis* Ameghino, 1888 (Mammalia, Proboscidea). **Geobios**, 2025. (*No prelo/Ahead of print*).
- MOTHÉ, D. et al. The micro from mega: dental calculus description and the first record of fossilized oral bacteria from an extinct proboscidean. **International Journal of Paleopathology**, v. 33, p. 55-60, 2021.

MOTHÉ, D.; AVILLA, L. S. Population structure of the gomphothere *Stegomastodon waringi* (Mammalia: Proboscidea: Gomphotheriidae) from the Pleistocene of Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 82, n. 4, p. 983-996, 2010.

MOTHÉ, D.; AVILLA, L. S. Mythbusting evolutionary issues on South American Gomphotheriidae (Mammalia: Proboscidea). **Quaternary Science Reviews**, v. 110, p. 23-35, 2015.

MOTHÉ, D.; FERRETTI, M. P.; AVILLA, L. S. Running over the same old ground: *Stegomastodon* never roamed South America. **Journal of Mammalian Evolution**, v. 26, p. 165-177, 2019.

PASENKO, M. R. New remains of *Rhynchotherium falconeri* (Mammalia, Proboscidea) from the earliest Pleistocene 111 Ranch, Arizona, USA with a discussion on sexual dimorphism and paleoenvironment of rhynchotheres. **Palaeodiversity**, v. 5, p. 89-97, 2012.

PAULA-COUTO, C. **Tratado de Paleomastozoologia**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 1979. 590 p.

PINTO, J. L. et al. Quantitative evidence for dimorphism suggests sexual selection in the maxillary caniniform process of *Placerias hesternus*. **PLoS ONE**, v. 19, n. 5, p. e0297894, 2024.

POUGH, F. H.; HEISER, J. B.; MCFARLAND, W. N. **A vida dos vertebrados**. São Paulo: Atheneu, 2003.

PRATES, Luciano; MEDINA, Matías E.; PEREZ, S. Ivan. Extinct megafauna dominated human subsistence in southern South America before 11,600 years ago. **Science Advances**, v. 11, n. 40, p. eadx2615, 2025.

ROTH, V. L. How elephants grow: heterochrony and the calibration of developmental stages in some living and fossil species. **Journal of Vertebrate Paleontology**, v. 4, n. 1, p. 126-145, 1984.

SAITTA, E. T. Evidence for sexual dimorphism in the plated dinosaur *Stegosaurus mjosi* (Ornithischia, Stegosauria) from the Morrison Formation (Upper Jurassic) of western USA. **PLoS ONE**, v. 10, n. 4, p. e0123503, 2015.

SCARPELINE, E. F. S.; OLIVEIRA, F. G. S.; FERREIRA, L. R. **Confecção de um guia didático sobre paleontologia para estudantes do ensino básico**. 2025.

SHRADER, Adrian Morgan *et al.* Growth and age determination of African savanna elephants. **Journal of Zoology**, v. 270, n. 1, p. 40-48, 2006.

SCHNEIDER, C. A.; RASBAND, W. S.; ELICEIRI, K. W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. **Nature Methods**, v. 9, n. 7, p. 671-675, 2012.

SHOSHANI, J.; TASSY, P. (Ed.). **The Proboscidea**: evolution and palaeoecology of elephants and their relatives. Oxford: Oxford University Press, 1996. 472 p.

SILVA, C. C. M. **Proposta de um guia de atividades práticas para abordagem de conteúdos da paleontologia no ensino fundamental**. 2025. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Ciências Biológicas) – Centro Acadêmico de Vitória, Universidade Federal de Pernambuco, Vitória de Santo Antão, 2025.

SIMPSON, G. G.; PAULA-COUTO, C. The Mastodonts of Brazil. **Bulletin of the American Museum of Natural History**, v. 112, p. 125-190, 1957.

SMITH, K. M.; FISHER, D. C. Sexual dimorphism and inter-generic variation in proboscidean tusks: multivariate assessment of American mastodons (*Mammot americanum*) and extant African elephants. **Journal of Mammalian Evolution**, v. 20, p. 337-355, 2013.

VIDYA, T. N. C.; SUKUMAR, R. Social organization of the Asian elephant (*Elephas maximus*) in southern India inferred from microsatellite DNA. **Journal of Ethology**, v. 23, n. 2, p. 205-210, 2005.

WANG, S. et al. Evolution of *Protanancus* (Proboscidea, Mammalia) in East Asia. **Journal of Vertebrate Paleontology**, v. 35, n. 1, p. e881830, 2015.

WOODBURNE, M. O. The great American biotic interchange: dispersals, tectonics, climate, sea level and holding pens. **Journal of Mammalian Evolution**, v. 17, p. 245-264, 2010.