

Capítulo XIII

CLADÍSTICA 3D: UMA NOVA PERSPETIVA PARA ANÁLISES FILOGENÉTICAS COMO FERRAMENTA PARA CONSERVAÇÃO COSTEIRA E CIÊNCIA CIDADÃ





CLADÍSTICA 3D: UMA NOVA PERSPETIVA PARA ANÁLISES FILOGENÉTICAS COMO FERRAMENTA PARA CONSERVAÇÃO COSTEIRA E CIÊNCIA CIDADÃ

Márcia Filipa Sousa Venâncio¹; José Carlos Antunes²; Dimítri de Araújo Costa³

^{1,2,3}Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental, Universidade do Porto, Avenida General Norton de Matos, s/n, Matosinhos, Portugal, 4450-208, ¹mvenancio@ciimar.up.pt, ²cantunes@ciimar.up.pt, ³dimitri.costa@ciimar.up.pt

RESUMO

Neste trabalho revisitamos o estudo da cladística e a sua importância para a ciência cidadã/comunicação científica, juntamente com a componente da ilustração 3D como ferramenta útil para a análise filogenética. A cladística é uma análise filogenética criada por Willi Hennig, que permite formular hipóteses sobre as relações ancestral-descendente, usando um cladograma para representar graficamente um sistema biológico. Visto que a cladística morfológica caiu em desuso nas últimas décadas, pretendemos com este trabalho inovar a forma desta análise, de maneira que ela se torne mais perceptível e visualmente mais interessante, o que pode despertar um novo interesse para estudos filogenéticos baseados na morfologia. O objetivo não é produzir uma análise cladística exaustiva, mas é mostrar a importância da ilustração 3D para auxiliar a análise cladística, tornando-se um componente promovedor para a divulgação científica. Como exemplo demonstrativo de aplicabilidade, para este estudo analisamos espécies dos géneros de equinodermos *Marthasterias* e *Asterias* e produzimos modelos 3D dos organismos, do cladograma, e das características distintivas (incluindo as apomórficas) usando o software *ZBrush*. Este tipo de comunicação visual tem especial importância para captar a atenção do público em geral para a ciência, sendo uma forma apelativa de comunicar, permitindo melhorar a literacia oceânica e o crescimento da ciência cidadã. Este estudo é um ponto de partida, mas futuramente a “cladística 3D” poderá ser amplamente aplicada em museus, livros, websites, etc.

Palavras-chave: Cladística; Divulgação e comunicação científica; Sistemática filogenética; Ilustração científica 3D; Ecossistemas marinhos.

ABSTRACT

Cladistics is a phylogenetic analysis created by Willi Hennig, that allows to make hypothesis about ancestor-descendent relationships using a cladogram to represent graphically a biological system. In this study, we revisit the study of cladistics and its importance for citizen science/science communication, along with the component of 3D illustration as a useful tool for phylogenetic analysis. Since

morphological cladistics has fallen somewhat into disuse in recent decades, we intend through this work to innovate the form of this analysis, so it becomes more perceptible and visually more interesting, which may awaken a new interest for phylogenetic studies based on morphology. The objective is not to produce an exhaustive cladistic analysis, but to show the importance of 3D illustration for science communication. To this study we analysed species from the echinoderm genera *Marthasterias* and *Asterias* and we did the 3D model of the distinctive characteristics using the software *Zbrush*. This kind of visual science communication has special importance to capture attention of the general public to science, as is an appealing way of communicate, allowing to improve ocean literacy and the growing of citizen science. This study is a start point, but in the future the 3D cladistics can be applied in museums, books, websites, etc.

Keywords: Cladistics; Scientific divulgation; Phylogenetic systematics; Scientific illustration; Marine ecosystems.

INTRODUÇÃO

A filogenética assenta nos pressupostos de que: a evolução ocorre; existe uma única filogenia da vida e é o resultado da descendência genealógica; as características são passadas de geração em geração, modificadas ou não, durante a descendência genealógica (Brooks et al., 1984).

A cladística é uma análise filogenética criada por Willi Hennig (O'Brien et al., 2001; Platnick & Cameron, 1977), com um método comparativo que permite formular hipóteses sobre as relações ancestrais-descendentes (O'Brien et al., 2001; Platnick & Cameron, 1977), utilizando um cladograma (um dendrograma bifurcado, assimétrico e sem eixos verticais e horizontais definidos) para representar graficamente um sistema biológico (Christoffersen, 1995).

A análise cladística combina a morfologia, fisiologia, comportamento, ecologia e distribuição geográfica de modo a compreender como as espécies evoluíram (Hennig, 1966; Wheeler et al., 2013), num panorama temporal de seleção natural.

Nesse tipo de estudo, o foco central não é apenas o grau de semelhança ou diferença entre as espécies, mas sim a forma como essas características se relacionam com condições anteriores (Hennig, 1966).

A cladística mudou ao longo dos anos devido ao advento de novos métodos e fontes de dados (Kluge & Wolf, 1993; Wheeler et al., 2013). Um exemplo são os dados moleculares, que têm vindo a ganhar um papel importante na análise filogenética. Apesar disso, é importante combinar este método com os tradicionais, uma vez que os dados moleculares oferecem resolução de escala fina pouco confiável dentro de vários clados (Assis, 2017; Jenner et al., 2004).

Sendo a cladística um método comparativo, é importante fazer a sua representação e documentação através de ilustrações. No entanto, os materiais de referência (neste caso, os cladogramas) são frequentemente limitados a desenhos meramente planos, esquemáticos e simplistas (Yeager, 2016). É essencial criar representações anatómicas claras e precisas, mas ao mesmo tempo incorporar as texturas, cores e volumes, sendo objetivo não apenas fornecer ilustrações precisas, mas também ilustrações que envolvam ativamente o observador, de modo a ajudar a moldar a maneira como o público interpreta a ilustração representada (Yeager, 2016). Desta forma, o observador poderá tirar conclusões sobre as semelhanças e relações entre os diferentes grupos representados no cladograma.

Num estudo realizado por Yeager (2016), foram explorados e representados, fazendo a conciliação do desenho técnico e da incorporação de cores e texturas nas ilustrações, os músculos da mandíbula de diferentes dinossauros terópodes e seus parentes existentes, sendo descritas visualmente as diferenças e semelhanças morfológicas num cladograma (Yeager, 2016). No presente estudo, queremos ir mais longe e incorporar também a componente da ilustração 3D, uma vez que este tipo de representação permite uma visão mais ampla, através da visualização do espécime em diferentes perspetivas e diferentes ampliações.

Assim, neste trabalho revisitamos o estudo

da cladística e a sua importância para a ciência cidadã/comunicação científica, juntamente com a componente de ilustração 3D como ferramenta útil para a análise filogenética. No entanto, o objetivo não é realizar uma análise cladística exaustiva, mas mostrar a importância da ilustração 3D para a divulgação científica.

METODOLOGIA

Pesquisa, análise em campo e observação laboratorial

Para este estudo escolhemos os géneros *Marthasterias* Jullien, 1878 e *Asterias* Linnaeus, 1758 para fazer a análise cladística e a ilustração 3D das espécies deste grupo.

A escolha de *Marthasterias* deve-se ao facto de ser muito comum em toda a Europa (Atlântico Norte Ibérico, a nossa área de estudo) e também porque as espécies deste género possuem controvérsia quanto aos seus estatutos taxonómicos e, conseqüentemente, pode ser interessante fazer uma revisão das espécies de *Marthasterias* (mesmo que nosso objetivo aqui não seja resolver esse problema). Este género possui duas espécies aceites: *Marthasterias africana* (Müller & Troschel, 1842) e *Marthasterias glacialis* (Linnaeus, 1758) (WoRMS Editorial Board, 2023). No entanto, para além destas duas espécies, também analisamos: *Marthasterias foliacea* Jullien, 1878, aceite como *M. glacialis* (sinonimizado de acordo com Sladen, 1889); *Marthasterias rarispina* (Perrier, 1875), aceite como *M. glacialis* (Clark & Courtman-Stock, 1976); e *Marthasterias sertulifera* (Xantus, 1860), aceite como *Astrometis sertulifera* (Xantus, 1860) (WoRMS Editorial Board, 2023).

Também analisámos o género *Asterias*, por ser um grupo irmão de *Marthasterias*, pertencendo à mesma família (Jullien, 1878; Linchangco et al., 2017), de maneira a comparar as características distintivas, incluindo as apomórficas. Deste género, escolhemos duas espécies: *Asterias rubens* (Linnaeus, 1758), uma vez que é uma espécie bem distribuída pela Europa, e *Asterias amurensis* (Lutken, 1871), uma espécie com algumas ocorrências na Europa (GBIF, 2023). Para esta escolha analisámos quais as espécies deste género que ocorrem em toda a Europa (já que queríamos

focar o nosso estudo nesta área), as quais são: *Asterias amurensis* (Lutken, 1871), *Asterias forbesi* (Desor, 1848) e *Asterias rubens* (MarBEF Data System - European Register of Marine Species (ERMS), 2023) Destas três espécies escolhemos a melhor distribuída pela Europa – *Asterias rubens* (GBIF, 2023).

Foi realizado um estudo pela literatura a fim de listar as principais características do grupo de estudo. Além disso, também observamos a espécie *M. glacialis*, coletada na Praia de Moledo (Norte de Portugal), na zona intertidal (Figura 1a), em 29/out/2022, por Márcia Venâncio e Dimítiri de Araújo Costa, GPS 41°50'33.7013" N, 8°52'24.8851" W. Os organismos observados encontravam-se entre as rochas (Figura 1b) e foram avistados com os braços retraídos (Figura 1c) e com os braços relaxados (Figura 1d).

Depois de coletado, o espécime foi observado em laboratório com recurso ao estereomicroscópio Nikon SMZ800 e foram tiradas fotografias das principais características com câmara digital acoplada ao estereomicroscópio.

Análise filogenética

Para a realização da análise filogenética, foram listadas as características distintivas do grupo de estudo. Para cada característica, foi aplicada a condição 0 (zero) como plesiomórfica e os números sucessivos seguintes (1, 2, ...) como condições apomórficas do mesmo caráter (Tabela I). O cladograma obtido foi construído manualmente através das interpretações das características, produzindo a árvore mais parcimoniosa possível, ou seja, com o menor número de passos evolutivos.

Modelagem 3D

Para modelos 3D das características observadas utilizamos o software *ZBrush*, versão 2022.0.6 (ZBrushCentral, 2023). O processo de modelação iniciou-se com uma esfera que foi esculpida com os *brushes* disponíveis neste software, nomeadamente: “Claybuildup”, “Move”, “Slash” e “Trimdynamic”. Tivemos em conta as diferentes referências (fotografias, observações, anotações e literatura) de cada característica de forma a esculpir o mais fielmente possível. Além

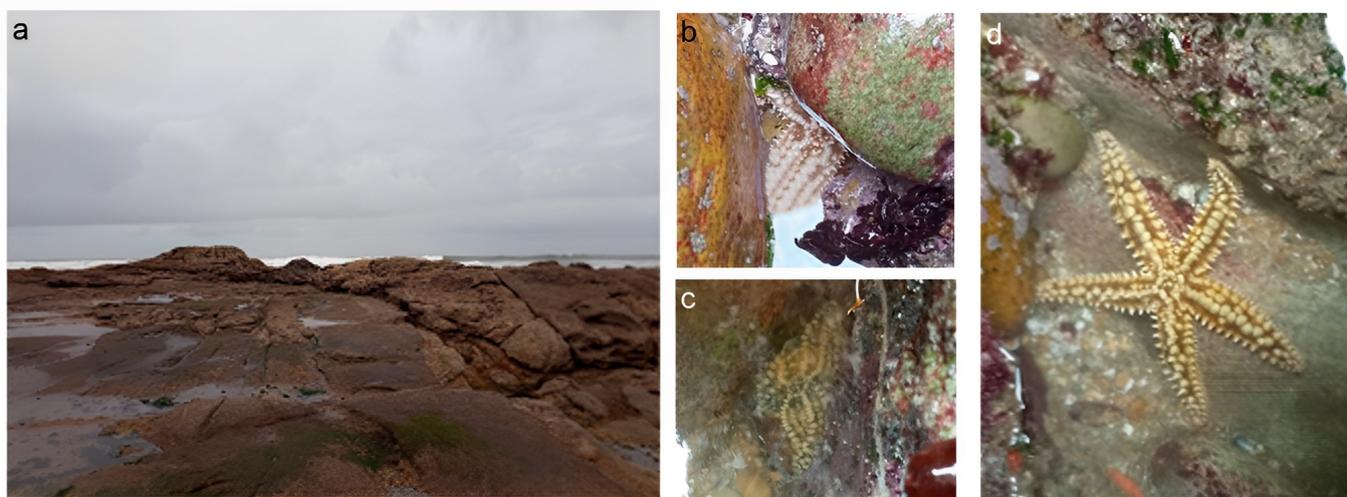


Figura 1. Fotografias do local de amostragem e dos exemplares observados na Praia de Moledo, Norte de Portugal: (a) Área de estudo, visão geral da zona intertidal; (b) *Marthasterias glacialis* entre rochas; (c) *M. glacialis* com os braços retraídos; (d) *M. glacialis* na rocha, com os braços relaxados. Fotos: M. Venâncio, D. Costa.

Tabela I. Matriz das características das espécies de *Marthasterias* e *Asterias*. **0**, estado plesiomórfico; **1**, estado apomórfico.

Espécies/Características	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>M. glacialis</i>	1	1	0	1	0	1	1	1
<i>M. africana</i>	0	0	1	0	1	1	1	1
<i>A. rubens</i>	0	0	0	0	0	0	0	0

disso, fizemos o processo de coloração do modelo e, por último, a renderização do modelo final. Por fim, foi realizada uma pequena animação com os modelos 3D obtidos de modo a mostrar as características das três espécies ao longo do cladograma.

Glossário

Para auxiliar a compreensão/significado de algumas palavras importantes, adicionamos um glossário em ordem alfabética (Anexo 1), indicado no manuscrito por um número sobrescrito.

RESULTADOS

O género *Marthasterias* Jullien, 1878

O género *Marthasterias*, originalmente descrito por Jullien em 1878 como um táxon pertencente à família Asteroiidae Gray, 1840, caracteriza-se por possuir tubos ambulacrais¹ em série de quatro, esqueleto dorsal reticulado, cinco braços², placas³ marginais⁴ delimitadas por uma membrana na qual os espinhos⁵ marginais estão alojados, pedicelários⁶ retos e sésseis (Jullien,

1878; Madeira et al., 2019). *Marthasterias* era considerado um grupo irmão do género *Asterias* (Société zoologique de France, 1878), contudo, num estudo mais recente, *Marthasterias* é atualmente aceite como grupo irmão de toda o clado Asteroiidae (Mah & Foltz, 2011). Este género está distribuído do intertidal baixo até quase 200 m de profundidade, em rocha e cascalho, no norte da Noruega até o Mediterrâneo e a África Ocidental e com populações periféricas distantes ao redor do Cabo da Boa Esperança, África do Sul (GBIF, 2023; WoRMS Editorial Board, 2023; Wright et al., 2016).

O género *Marthasterias* contém duas espécies aceites: *M. africana* e *M. glacialis*. A espécie *M. glacialis* é encontrada desde o norte da Noruega até o Mediterrâneo e a África Ocidental, enquanto que *M. africana* é encontrada somente na África do Sul (GBIF, 2023; WoRMS Editorial Board, 2023).

A espécie *M. glacialis* é descrita por possuir um forte esqueleto abactinal⁷, com três séries longitudinais de placas primárias; as placas na linha

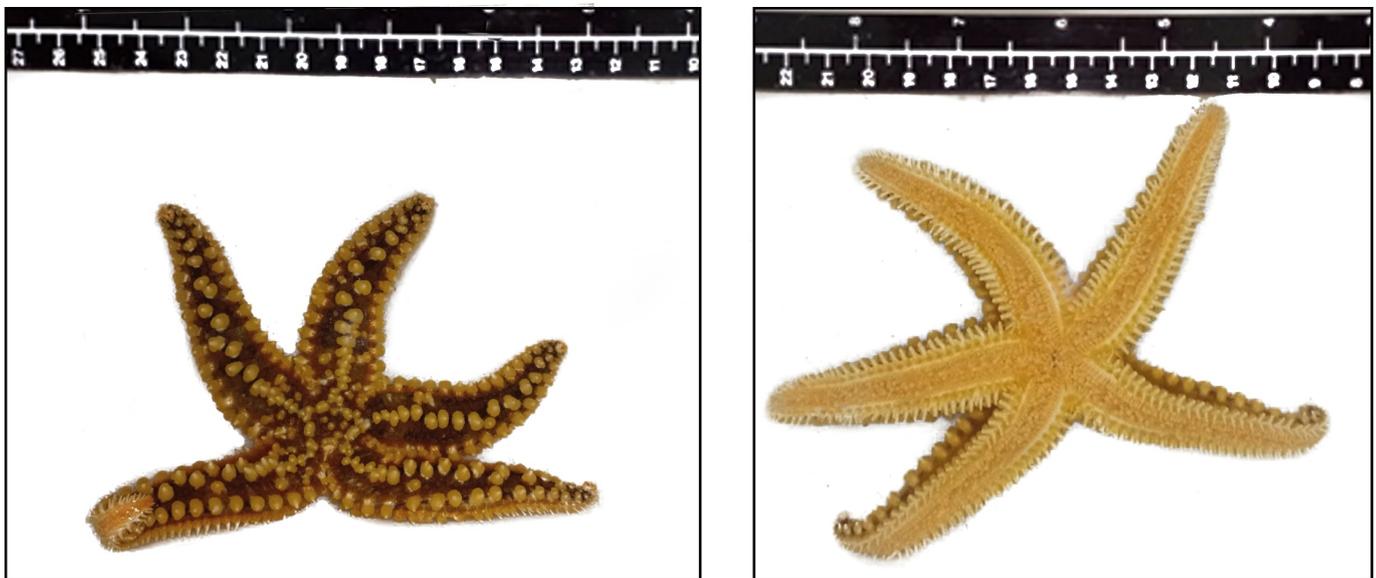


Figura 2. Aspeto geral da espécie *Marthasterias glacialis*: (a) vista dorsal; (b) visão ventral. Fotos: M. Venâncio.

¹Pequenos sistemas tubulares flexíveis da maioria dos equinodermos que são extensões do sistema hidrovascular e que se projetam através de aberturas no esqueleto ou entre os elementos esqueléticos e são usados especialmente na locomoção e preensão.

²Em asteróides, crinóides e ofiuróides, é uma projeção móvel ambulacral das articulações, distal ao disco ou cálice, que carrega um ramo radial do sistema vascular da água e do sistema nervoso. Às vezes é chamado de raio.

³As estruturas tubulares com uma forma característica e uma posição fixa.

⁴Região de borda de uma estrutura. Nos asteróides, é a região que cobre as laterais dos braços.

⁵Pequenas estruturas apicais pontiagudas, fixadas na superfície das placas.

⁶Pequenos elementos com mandíbulas no corpo de ouriços-do-mar e estrelas-do-mar usados para limpar a superfície do corpo e como meio de defesa.

médio-dorsal do braço (Figura 2a) formam uma série regular, ziguezagueando distalmente com um a dois espinhos cónicos firmes, circundados por uma grande coroa de pedicelários cruzados (Figura 3a); a série dorsolateral de cada lado parcialmente espinhosa com espinhos (quando presentes) geralmente menores que os carinais em todos os espécimes, exceto nos menores, onde estão ausentes; placas superomarginais⁸ como na região médio-dorsal do braço dispostas em série regular com um a dois espinhos, também circundadas por coroa de pedicelários cruzados (Figura 3b); na região ventral (Figura 2b), encontram-se os tubos ambulacrais organizados em quatro (Figura 3c), a placa inferomarginal contém dois espinhos oblíquos (bicantídeos⁹) ligeiramente achatados e de comprimento semelhante aos abactinais (Figura 3d), o externo com pedicelários cruzados circundando apenas a face externa; uma única série

actinal¹⁰ sem espinhos; placas adambulacrais monocantídas¹¹; pedicelários retos e lanceolados espalhados na superfície ventral, particularmente dentro do sulco (Madeira et al., 2019).

A espécie *M. africana* foi originalmente descrita espécie e posteriormente reduzida a um nível de variedade de *glacialis* por Mortensen (1933) e como forma por Clark (1974). Após revisão deste género, em 2016 *M. africana* foi restabelecida como espécie por Wright et al. (WoRMS Editorial Board, 2023; Wright et al., 2016).

A espécie *M. foliacea*, atualmente aceite como *M. glacialis*, e foi descrita pela primeira vez por Jullien em 1878 como tendo tubos ambulacrais em séries de quatro, cinco braços com comprimento desigual ligeiramente convexo e apenas uma fileira de espinhos ambulacrais (Jullien, 1878).

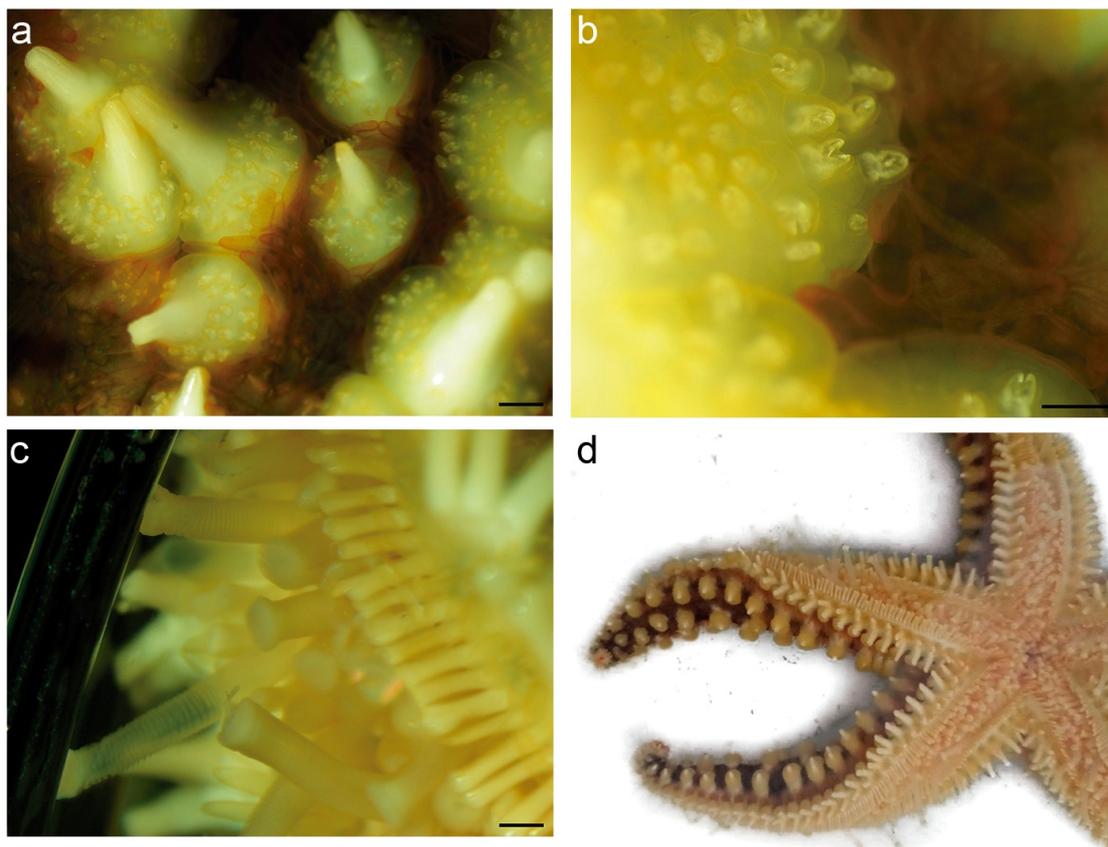


Figura 3. Características da espécie *Marthasterias glacialis*: (a) espinhos circundados por pedicelários; (b) pedicelários organizados em rosetas; (c) tubos ambulacrais; e (d) espinhos bicantídeos inferomarginais. A barra de escala representa 1mm. Fotos: M. Venâncio.

⁷A área do corpo oposta à boca.

⁸Uma fileira de placas definindo a borda dorsal do corpo. Estas estão abaixo das placas cranianas e sobrepõem uma fileira de placas inferomarginais.

⁹O espinho da placa divide-se, há dois espinhos visíveis.

¹⁰A superfície do corpo que contém a boca.

¹¹O espinho da placa não se divide, apenas um espinho é visível. Pequenas estruturas apicais pontiagudas, fixadas na superfície das placas.

A espécie *M. rarispina* foi descrita por Perrier em 1875, e atualmente é aceita como *M. glacialis*, com várias semelhanças morfológicas compartilhadas, mas com braços um pouco mais curtos, mais angulosos e com menos espinhos (Perrier, 1875).

A espécie *M. sertulifera*, atualmente aceita como *Astrometis sertulifera*, foi descrita pela primeira vez por Xantus em 1860 (Xantus, 1860). Possui cinco braços angulares, cada braço com duas vezes e um quarto do diâmetro do disco¹², espinhos ambulacrais delgados e em fileira única. O lado dorsal do braço tem cinco fileiras regulares de espinhos cilíndricos ou moderadamente pontiagudos, quase tão grandes quanto os do lado ventral. As fileiras laterais são mais regulares que as outras, e os espinhos dessas fileiras surgem de uma série muito regular de ossículos¹³ subtriangulares, um espinho para cada ossículo alternado. Esses espinhos dorsais são todos rodeados em ou perto das suas pontas com uma espessa coroa de pedicelários. Não possui pedicelários nos intervalos entre os espinhos (Xantus, 1860).

O género *Asterias* Linnaeus, 1758

Asterias é outro género da família Asteroidea. Este género foi descrito pela primeira vez por Carl Linnaeus na 10ª edição do *Systema Naturae* em 1758, quando publicou a espécie *A. rubens* (Linnaeus, 1758). *Asterias*, como a maioria dos géneros de estrelas do mar na ordem Forcipulatida Perrier, 1884, são reconhecíveis externamente pelos seus pedicelários, muitos milhares de minúsculas estruturas semelhantes a mandíbulas na pele que podem se fechar para beliscar presas ou predadores. O género *Asterias* possui dois tipos de pedicelários presentes: os pedicelários retos, que se encontram dispersos em sua pele, e os pedicelários cruzados, que são encontrados em tufos ou coroas ao redor dos grandes espinhos dorsais. Todas as espécies normalmente têm cinco braços. Internamente, o exoesqueleto também apresenta alguns caracteres

diagnósticos, como as placas dorsais com apenas um único espinho no centro. Esses organismos habitam áreas oceânicas rasas (a zona litoral) de partes frias a temperadas do Holártico; e possuem uma fase de larvas planctónicas (Sladen, 1889; Verrill, 1914).

Este género contém um total de oito espécies válidas: *Asterias amurensis* Lutken, 1871, *Asterias argonauta* Djakonov, 1950, *Asterias forbesi* (Desor, 1848), *Asterias microdiscus* Djakonov, 1950, *Asterias rathbuni* (Verrill, 1909), *Asterias rollestoni* Bell, 1881, *Asterias rubens* Linnaeus, 1758 e *Asterias versicolor* Sladen, 1889 (WoRMS Editorial Board, 2022).

Para a análise proposta neste estudo, escolhemos a espécie *Asterias rubens* como grupo irmão, por ser considerada um táxon representativo deste género, e por poder ser encontrada em ambiente semelhante a *Marthasterias* nas costas europeias (localidade foco deste estudo). Além disso, *Asterias rubens* representa o táxon homônimo para a descrição original da família *Asteriidae* para o estabelecimento do género *Asterias* (WoRMS Editorial Board, 2023).

A espécie *Asterias rubens* é a estrela-do-mar mais comum na região do Atlântico Nordeste, pode crescer até 52 cm de diâmetro, mas geralmente tem entre 10 a 30 cm, com variação de cor, embora geralmente seja laranja, marrom claro ou violeta (*Asterias rubens* - *Marine Life Encyclopedia*, 2023; *Structure of Asterias*, 2023) (Figura 4). Possui cinco braços delgados (raramente 4-8) e um pequeno disco, a parede corporal é muito flexível com numerosos grupos de pápulas¹⁴ (brânquias da pele) em áreas moles. Os espinhos principais na superfície superior estão geralmente numa ou mais fileiras longitudinais, às vezes cercados por feixes de pedicelários retos e cruzados. Pedicelários retos na superfície inferior em sulcos ambulacrais e presos a espinhos do sulco (*Marine Species Identification Portal*, 2023). Os espinhos adambulacrais na parte proximal do braço estão alternados regularmente em um e dois (*Marine Species Identification Portal*, 2023) (Figura 5).

¹²A região redonda ou pentagonal da região central do corpo de ofiuróides e asteroides.

¹³Elemento esquelético pequeno, geralmente microscópico, embutido no tegumento.

¹⁴Uma das pequenas projeções ciliadas da parede do corpo de um equinodermo, servindo para a respiração. As pápulas podem ser em forma de dedo ou luva e, às vezes, estão dispostas em manchas densas.

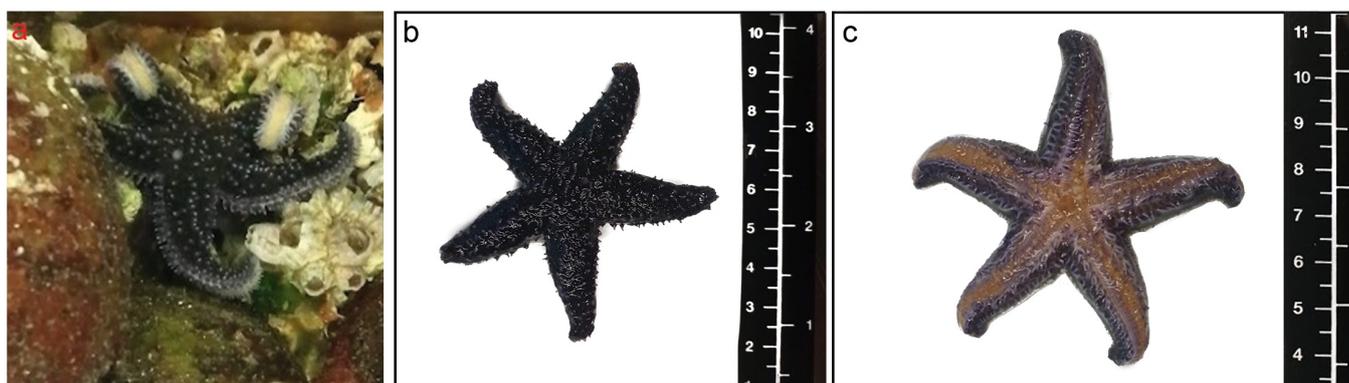


Figura 4. (a) Ambiente da espécie *Asterias rubens* e seu aspeto geral; (b) vista dorsal; (c) vista ventral. Fotos: M. Venâncio.



Figura 5. Características da espécie *Asterias rubens*: (a) espinhos circundados por pedicelários; (b) pedicelários organizados em rosetas envolvendo os espinhos e pedicelários individuais sobre o corpo; (c) tubos ambulacrais e espinhos bicantídeos inferomarginais. A barra de escala representa 1mm. Fotos: M. Venâncio.

Filogenia de *Marthasterias* e *Asterias* – Abordagem biogeográfica-temporal

A evidência fóssil sugere que o género *Asterias* chegou ao Atlântico Norte durante o intercâmbio trans-ártico (cerca de 3,50 Ma - Milhões de anos), num período em que esta região era 5-6°C mais quente (Wares & Cunningham, 2001).

A filogenia do género *Marthasterias* provavelmente foi moldada por mudanças recentes nos padrões oceanográficos e no clima (Pérez-Portela et al., 2017). As principais mudanças nos padrões oceânicos resultaram inicialmente na divisão entre as linhagens do Norte e do Sul. Posteriormente, os períodos glaciais provavelmente aumentaram a variação das linhagens europeias, seguidas pela expansão pós-glacial, facilitando os contatos secundários e a mistura genética (Pérez-Portela et al., 2017).

As flutuações climáticas quaternárias nos últimos 2,40 Ma provavelmente desencadearam a divisão das linhagens de *Marthasterias* entre os hemisférios norte e sul. Esta diferenciação foi intensificada pelo aumento da ressurgência de Benguela durante a transição entre o final do

Pliocénico e o início do Pleistocénico (cerca de 1,80 Ma), juntamente com o estabelecimento da atual circulação oceânica ao longo do Atlântico Este, promovendo a descontinuidade genética entre os hemisférios. Portanto, as árvores filogenéticas sugerem uma divergência de *M. africana* da linhagem do Norte entre 1,78 e 1,41 Ma (Pérez-Portela et al., 2017).

Cladograma 3D

Através da análise das características obtidas na literatura e na observação (Anexo 1), construímos um cladograma (Figura 6) e os modelos 3D de cada característica distintiva e de cada espécie analisada (Figura 7). Com os modelos obtidos foi feito um pequeno vídeo do cladograma 3D (link para o vídeo:

https://drive.google.com/drive/folders/1kehCr7dL_myqoGEeFJzdpIsg6wdBqGvE).

DISCUSSÃO

Análise filogenética hipotética de *Marthasterias*

As diferenças encontradas entre *Asterias rubens* e as duas espécies aceites de *Marthasterias* estão no número de fileiras de espinhos da placa

adambulacral¹⁵ e no tipo de pedicelários que circundam os espinhos (Figura 6). Enquanto *A. rubens* tem duas fileiras de espinhos ambulacrais [6(0)] e dois tipos de pedicelários envolvendo os espinhos [7(0)], *Marthasterias spp.* possuem apenas uma fileira de espinhos ambulacrais [6(1)] e apenas pedicelários cruzados envolvendo os espinhos [7(1)]. Além disso, a espécie *M. glacialis* diferencia-se de *A. rubens* por ter os espinhos totalmente agrupados [1(1)], três ou mais fileiras de espinhos agrupados na superfície dorsal [2(1)] e espinhos dorsolaterais reduzidos ou ausentes [4(1)],

e a espécie *M. africana* por portar múltiplos espinhos por placa dorsal [3(1)] e espinhos actinais [5(1)].

As características distintivas entre as duas espécies de *Marthasterias* estão no padrão de armamento dos espinhos (distribuição dos espinhos), no número de fileiras de espinhos agrupados na superfície dorsal, no número de espinhos por placa dorsal (ou placa carinal¹⁶), na presença ou ausência de espinhos dorsolaterais e na presença ou ausência de espinhos actinais. A espécie *M. glacialis* possui espinhos dorsolaterais e

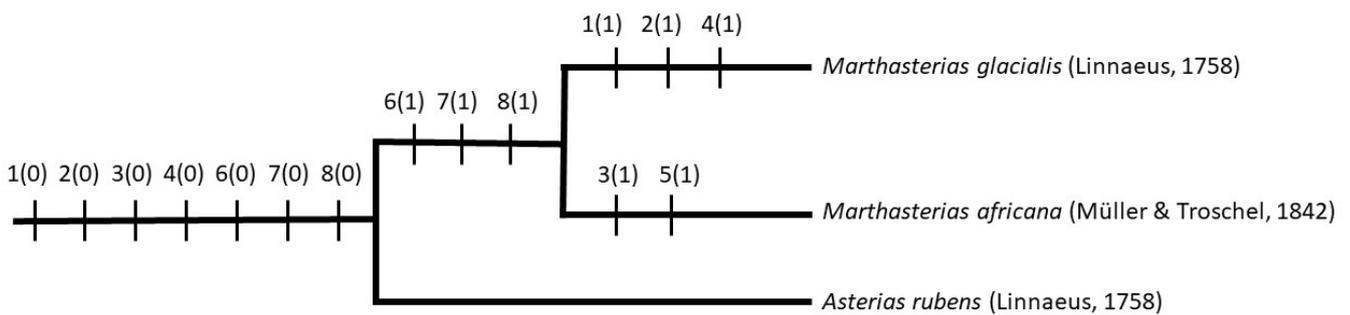


Figura 6. Cladograma hipotético evidenciando as diferentes características das espécies de estudo: *Marthasterias glacialis*, *Marthasterias africana* e *Asterias rubens*. 1-9 - características distintivas. Condição (0) plesiomórfica; (1) apomórfica.



Figura 7. Modelos 3D das espécies de estudo (produzidas no software ZBrush): *Asterias rubens* – (a) vista dorsal e (b) vista ventral; *Marthasterias glacialis* – (c) vista dorsal e (d) vista ventral; e *Marthasterias africana* - (e) vista dorsal e (f) vista ventral.

¹⁵Placas que formam uma série distinta em cada lado da ranhura do pé ou sulco ambulacral na parte inferior dos braços de Asteroidea.

¹⁶Relativo a, ou envolvendo a área no lado dorsal superior.

dorsais totalmente agrupados [1(1)] em três ou mais fileiras [2(1)], enquanto que a espécie *M. africana* possui espinhos agrupados apenas na linha dorsal [1(0)] (uma fileira de espinhos agrupados [2(0)]). Em relação ao número de espinhos por placa, *M. glacialis* tem um espinho por placa [3(0)], enquanto *M. africana* tem múltiplos espinhos por placa [3(1)]. Os espinhos dorsolaterais estão presentes em *M. africana* [4(0)] e reduzidos ou ausentes em *M. glacialis* [4(1)] (Clark 1951). Finalmente, *M. africana* pode ter um espinho actinal [5(1)] simulando a presença de um terceiro espinho inferomarginal (Wright et al. 2016), provavelmente representando um carácter autapomórfico.

Em relação às espécies não aceites, *M. foliacea* e *M. rasparina*, não encontramos nenhuma característica distintiva de *M. glacialis*, reforçando a ideia de serem sinónimos.

M. sertulifera, aceite como *Astrometis sertulifera*, difere das espécies *A. rubens*, *M. glacialis* e *M. africana* por possuir cinco fileiras regulares de espinhos no lado dorsal do braço e por possuir pedicelários apenas circundando os espinhos (Xantus 1860).

Importância da cladística e da Ciência Cidadã

A Ciência Cidadã tem sido uma mais-valia em diferentes áreas de estudo. Com este trabalho, pretendemos mostrar que a combinação de cladística/sistemática filogenética e ciência cidadã pode também trazer diversos benefícios (como entendimento mais fidedigno do contexto evolutivo, e importância da conservação/preservação biológica), aproximando este tema complexo à sociedade em comum. As iniciativas de ciência cidadã, como plataformas online de biodiversidade, possibilitam documentar espécies observadas pelo público em grandes áreas geográficas (Klemann-Junior et al., 2017; Vendetti et al., 2018). A aplicabilidade da ciência cidadã ao estudo da biodiversidade pode impulsionar os inventários faunísticos, aumentando os registos de taxa de vida urbana (através de registos efetuados pela população), e contribuir para o conhecimento biogeográfico e políticas de conservação, auxiliando no desenvolvimento da ciência e da educação (Klemann-Junior et al., 2017; Oh et al., 2019; Vendetti et al., 2018). Além disso, a ciência

cidadã apoia registos disponíveis gratuitamente (como o site iNaturalist: <https://www.inaturalist.org/>), permitindo o rastreamento de mudanças em populações, comunidades e ecossistemas e a compreensão de padrões ecológicos (Klemann-Junior et al., 2017). Por outro lado, as iniciativas de ciência cidadã são um meio eficaz de disseminação do conhecimento, beneficiando os participantes, melhorando sua compreensão da ciência e o seu compromisso com a natureza e a comunidade (Vendetti et al., 2018).

No entanto, como os bancos de dados de ciência cidadã são coletados principalmente por não especialistas, é importante a verificação e validação dos dados recolhidos para detetar desinformação (Klemann-Junior et al., 2017).

Para fazer esse tipo de combinação entre cladística e ciência cidadã, é importante transmitir as informações e as definições de forma clara e explícita, a fim de reduzir problemas de comunicação ao transmitir ciência para quem está fora da comunidade científica e até mesmo para cientistas (Bronzati, 2017). Um exemplo disto é o ensino de ciências a crianças. Conforme mostrado num estudo recente em duas escolas públicas primárias na região tropical brasileira, com a inclusão de atividades lúdicas/práticas, que possibilitou melhoras ao processo de aprendizagem (Costa et al., 2021). No referido estudo, foram incluídas diferentes atividades (coletas de campo, visita a aquários/museus, representações teatrais, escrita criativa/“cordel” e feiras de ciências), que demonstraram serem mais eficientes para consolidar o processo de aprendizagem do que o ensino tradicional, pois fornecem motivação adicional aos alunos (Costa et al., 2021). Num outro estudo, foram realizadas atividades pedagógicas no ambiente formal de ensino como estratégia de reconhecimento, sensibilização e conservação de organismos do Filo Echinodermata (Stevenson et al., 2023). As atividades realizadas consistiram em: aula expositiva dialogada; aula de campo; aula prática; e oficina pedagógica. Destas atividades, a aula de campo foi a alternativa pela qual os alunos mais se interessaram. Após a realização destas atividades, foi observada uma maior percentagem de respostas corretas ao questionário (realizado antes e após as atividades), mostrando assim que a

realização de atividades lúdicas e diferenciadas é uma estratégia que facilita a assimilação do assunto e desperta a curiosidade e participação dos alunos (Stevenson et al., 2023).

A animação obtida neste estudo poderá ser exposta em diferentes plataformas (através de vídeos e links) de modo a ser utilizada como ferramenta de divulgação científica para o público em geral, fazendo com que as pessoas achem a ciência mais atrativa e desenvolvam interesse por ela.

Ilustração 3D e cladística

Através da ilustração 3D, a ciência pode ser mais atrativa para a comunidade, pois permite a manipulação do modelo observado, dando a possibilidade ao observador de interpretar o objeto à sua maneira individual, fomentando a curiosidade e a memorização a longo prazo (Ruthensteiner & Heß, 2008).

De acordo com um estudo realizado com alunos do 12.º ano selecionados aleatoriamente de várias escolas da Grécia, a utilização de aplicações multimídia 3D pode melhorar a forma como os alunos interpretam um objeto, permitindo um processo de aprendizagem de ciências mais eficiente (Korakakis et al., 2012). Neste estudo, foram utilizados diferentes tipos de visualização 3D (*Interactive 3D Virtual Environment* (I3DVE), *3D Animations Interface* (3DAIF) e *3D Static Illustrations Interface* (3DSIIF)) combinados com narração e texto em aplicações multimídia, de forma a compreender como este tipo de visualização interfere no processo de aprendizagem. O processo de aprendizagem foi avaliado através das respostas dos alunos ao questionário aplicado (Korakakis et al., 2012). As maiores taxas de respostas corretas às questões foram observadas nos alunos que utilizaram o I3DVE, devido a permitirem uma melhor compreensão e a poderem ser mais prontamente utilizadas pelos alunos na realização de tarefas de diferentes complexidades (Korakakis et al., 2012).

Por outro lado, a visualização gráfica 3D é também um recurso significativo entre a comunidade científica. Por exemplo, em estudos morfológicos é indispensável dar informação visual

detalhada dos dados/caracteres (Ruthensteiner & Heß, 2008).

CONCLUSÕES

Este estudo mostra a importância do uso de modelos 3D para ilustrar as características distintivas de cada ramo do cladograma para melhor compreender as relações entre cada grupo, i.e. análise gráfica 3D aplicada à cladística. Esta abordagem de comunicação visual tem especial importância para captar a atenção do público em geral/sociedade para a ciência, uma vez que é uma forma de comunicação eficiente. Assim, permite melhorar a literacia oceânica e o crescimento da ciência cidadã.

Este estudo é um ponto de partida, mas futuramente a “cladística 3D” poderá ser amplamente aplicada em museus, livros, websites, ações para conservação, etc.

REFERÊNCIAS

- Assis, L. C. S. (2017). The jazz of cladistics. In *Systematics and Biodiversity* (Vol. 15, Issue 5, pp. 385–390). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/14772000.2017.1279693>
- Asterias rubens - Marine Life Encyclopedia. (2023). <http://www.habitas.org.uk/marinelifespecies.asp?item=ZB1900>
- Bronzati, M. (2017). Should the terms ‘basal taxon’ and ‘transitional taxon’ be extinguished from cladistic studies with extinct organisms? In *Palaeontologia Electronica* (Vol. 20, Issue 2). Texas A and M University. <https://doi.org/10.26879/173e>
- Brooks, D. R., Caira, J. N., Platt, T. R., & Pritchard, M. R. (1984). *Principles and Methods of Phylogenetic Systematics: A Cladistics Workbook*. <https://doi.org/https://doi.org/10.5962/bhl.title.46889>
- Christoffersen, M. L. (1995). Cladistic taxonomy, phylogenetic systematics, and evolutionary ranking. *Systematic Biology*, 44(3), 440–454. <https://doi.org/10.1093/sysbio/44.3.440>
- Clark, A. M., & Courtman-Stock, J. (1976). *The echinoderms of southern Africa*. British Museum Press, 776.
- Costa, D. A., Lucena, R. F. P., Christoffersen, M. L., Piñeiro-Corbeira, C., & Dolbeth, M. (2021).

- Improving environmental awareness and ocean literacy through hands-on activities in the tropics. *Applied Environmental Education & Communication, Decade for Education for Sustainable Development*, 1–20. <https://doi.org/10.1080/1533015X.2021.1887778>
- GBIF. (2023). GBIF - Occurrences. Global Biodiversity Information Facility. <https://www.gbif.org/>
- Hennig, W. (1966). *Phylogenetic Systematics*. 97–115.
- Jenner, R. A., Onald, R., & Enner, A. J. (2004). The scientific status of metazoan cladistics: why current research practice must change.
- Jullien, J. (1878). Description d'un nouveau genre de Stelleride de la famille des Asteriadees. *Bulletin de La Société Zoologique de France*, 3, 141–143.
- Klemann-Junior, L., Vallejos, M. A. V., Scherer-Neto, P., & Vitule, J. R. S. (2017). Traditional scientific data Vs. Uncoordinated citizen science effort: A review of the current status and comparison of data on avifauna in Southern Brazil. *PLoS ONE*, 12(12). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0188819>
- Kluge, A. G., & Wolf, A. J. (1993). Cladistics: What's in a word? *Cladistics*, 9, 183–199.
- Korakakis, G., Boudouvis, A., Palyvos, J., & Pavlatou, E. A. (2012). The impact of 3D visualization types in instructional multimedia applications for teaching science. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 31, 145–149. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.12.032>
- Linchangco, G. V., Foltz, D. W., Reid, R., Williams, J., Nodzak, C., Kerr, A. M., Miller, A. K., Hunter, R., Wilson, N. G., Nielsen, W. J., Mah, C. L., Rouse, G. W., Wray, G. A., & Janies, D. A. (2017). The phylogeny of extant starfish (Asteroidea: Echinodermata) including *Xyloplax*, based on comparative transcriptomics. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 115, 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2017.07.022>
- Linnaeus, C. (1758). *Systema naturae per regna tria naturae: secundum classes, ordines, genera, species, cum characteribus, differentiis, synonymis, locis* (Editio dec). Impensis Direct. Laurentii Salvii. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.542>
- Madeira, P., Kroh, A., Cordeiro, R., De Frias Martins, A. M., & Ávila, S. P. (2019). The Echinoderm Fauna of the Azores (NE Atlantic Ocean). *Zootaxa*, 4639(1), 1–231. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4639.1>
- Mah, C., & Foltz, D. (2011). Molecular phylogeny of the Forcipulatacea (Asteroidea: Echinodermata): systematics and biogeography. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 162(3), 646–660. <https://doi.org/10.1111/J.1096-3642.2010.00688.X>
- MarBEF Data System - European Register of Marine Species (ERMS). (2023). <https://www.marbef.org/data/erms.php>
- Marine Species Identification Portal. (2023). http://species-identification.org/index.php?groep=Starfish+and+other+echinoderms&selectie=16&hoofdgroepen_pad=%2C1%2C16
- MarLIN - The Marine Life Information Network - Home. (2023). <https://www.marlin.ac.uk/>
- O'Brien, M. J., Darwent, J., & Lyman, R. L. (2001). Cladistics Is Useful for Reconstructing Archaeological Phylogenies: Palaeoindian Points from the Southeastern United States. *Journal of Archaeological Science*, 28(10), 1115–1136. <https://doi.org/10.1006/jasc.2001.0681>
- Oh, R. M., Neo, M. L., Yap, N. W. L., Jain, S. S., Tan, R., Chen, C. A., & Huang, D. (2019). Citizen science meets integrated taxonomy to uncover the diversity and distribution of Corallimorpharia in Singapore. *Raffles Bulletin of Zoology*, 67, 306–321. <https://doi.org/10.26107/RBZ-2019-0022>
- Pérez-Portela, R., Rius, M., & Villamor, A. (2017). Lineage splitting, secondary contacts and genetic admixture of a widely distributed marine invertebrate. *Journal of Biogeography*, 44(2), 446–460. <https://doi.org/10.1111/JBI.12917>
- Perrier, E. (1875). Révision de la collection de stellérides du Museum d'Histoire naturelle de Paris. In Reinwald (p. 384).
- Platnick, N. I., & Cameron, H. D. (1977). Cladistic Methods in Textual, Linguistic, and Phylogenetic Analysis. *Systematic Zoology*, 380–385. <http://sysbio.oxfordjournals.org/>
- Ruthensteiner, B., & Heß, M. (2008). Embedding 3D models of biological specimens in PDF publications. *Microscopy Research and Technique*, 71(11), 778–786. <https://doi.org/10.1002/jemt.20618>
- Sladen, W. P. (1889). Report on the Asteroidea. Report on the Scientific Results of the Voyage of

- H.M.S. Challenger during the years 1873-1876. *Zoology*, 30(51), 583. <http://www.19thcenturyscience.org/HMSC/HMSC-Reports/Zool-51/htm/doc.html>
- Société zoologique de France. (1878). *Bulletin de la Société zoologique de France: Vol. v.3 (1878)*. La Société. <https://www.biodiversitylibrary.org/item/110204>
- Stevenson, V., Prata, J., & Christoffersen, M. L. (2023). Filo Echinodermata: percepção e modelagem tridimensional com alunos de uma escola estadual em João Pessoa. *REnCiMa - Revista de Ensino de Ciência e Matemática*, 14(1), 1–25.
- Structure of Asterias. (2023).
- Vendetti, J. E., Burnett, E., Carlton, L., Curran, A. T., Lee, C., Matsumoto, R., Mc Donnell, R., Reich, I., & Willadsen, O. (2018). The introduced terrestrial slugs *Ambigolimax nyctelius* (Bourguignat, 1861) and *Ambigolimax valentianus* (Férussac, 1821) (Gastropoda: Limacidae) in California, with a discussion of taxonomy, systematics, and discovery by citizen science. *Journal of Natural History*, 53(25–26), 1607–1632. <https://doi.org/10.1080/00222933.2018.1536230>
- Verrill, A. E. (1914). *Monograph of the shallow-water starfishes of the North Pacific coast from the Arctic Ocean to California*. Harriman Alaska Series, 14(101–116), 188–196. <https://doi.org/10.5962/BHL.TITLE.2461>
- Wares, J. P., & Cunningham, C. W. (2001). Phylogeography and Historical Ecology of the North Atlantic Intertidal. *Evolution*, 55(12), 2455–2469. <https://doi.org/10.1111/J.0014-3820.2001.TB00760.X>
- Wheeler, Q., Assis, L., & Rieppel, O. (2013). Heed the father of cladistics. *Nature*, 496, 295–296.
- WoRMS Editorial Board. (2023). WoRMS - World Register of Marine Species. <https://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=123224#sources>
- Wright, A. G. (2013). Resolution of the *Marthasterias* Taxonomic “Disar-star.” University of Cape Town - Department of Biological Sciences.
- Wright, A. G., Pérez-Portela, R., & Griffiths, C. L. (2016). Determining the correct identity of South African *Marthasterias* (Echinodermata: Asteroidea). *African Journal of Marine Science*, 38(3), 443–455. <https://doi.org/10.2989/1814232X.2016.1222308>
- Xantus, J. (1860). Descriptions of three new species of starfishes from Cape St. Lucas. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 12(568), 568. <https://www.biodiversitylibrary.org/item/84757>
- Yeager, M. (2016). Visualization of Comparative Anatomy: Jaw muscles of Theropod Visualization of Comparative Anatomy: Jaw muscles of Theropod Dinosaurs and their extant relatives; Illustrating the story of Dinosaurs and their extant relatives; Illustrating the story of fun. <https://scholarworks.rit.edu/theses>
- ZBrushCentral. (2023). ZBrush (2022.0.5).

ANEXO 1

Características dos géneros *Marthasterias* e *Asterias*, utilizadas para elaboração da árvore de relações hipotética neste estudo

1. Padrão de armamento dos espinhos (distribuição dos espinhos)

(0) Apenas dorsalmente agrupados

(1) Totalmente agrupados

Asterias rubens: (0)

Marthasterias africana: (0)

Marthasterias glacialis: (1)

Os espinhos podem estar distribuídos aleatoriamente por todo o corpo, ou apenas nas placas dorsal, superomarginal e inferomarginal1. A espécie *M. glacialis* tem espinhos dorsolaterais e dorsais totalmente agrupados, enquanto *M. africana* pode variar de uma superfície extraordinariamente nua, com espinhos apenas nas placas dorsal e superomarginal, a muitos espinhos espalhados irregularmente, muitas vezes com múltiplos espinhos em cada placa (Wright, 2013; Wright et al., 2016). Os espinhos em *A. rubens* são distribuídos aleatoriamente, com espinhos agrupados apenas na linha dorsal, semelhante a *M. africana*, o que pode representar uma condição plesiomórfica desse caráter (MarLIN - The Marine Life Information Network - Home, 2023).

2. Número de fileiras de espinhos agrupados na superfície dorsal

(0) Uma ou duas

(1) Três ou mais

A. rubens: (0)

M. africana: (0)

M. glacialis: (1)

A espécie *M. glacialis* tem um padrão de armamento de espinhos de uma série de três ou mais fileiras regulares de espinhos ao longo de cada braço, enquanto *M. africana* é coberta por muitos espinhos espaçados irregularmente, ou tem uma superfície extraordinariamente nua com apenas uma ou mais fileiras de espinhos por braço (Wright, 2013; Wright et al., 2016). A espécie *A. rubens* possui os espinhos maiores na face superior dispostos numa ou mais fileiras longitudinais (MarLIN - The Marine Life Information Network - Home, 2023).

3. Número de espinhos por placa dorsal (ou placa carinal)

(0) Um único

(1) Múltiplos

A. rubens: (0)

M. glacialis: (0)

M. africana: (1)

O número de espinhos por placa foi categorizado como único ou múltiplo. A espécie *M. glacialis* tem um espinho por placa, enquanto *M. africana* tem vários espinhos para cada placa. *A. rubens* tem um espinho por placa, semelhante a *M. glacialis* (Wright, 2013; Wright et al., 2016), compartilhando assim a provável condição plesiomórfica deste caráter.

4. Espinhos dorsolaterais

(0) Presentes

(1) Reduzidos ou ausentes

A. rubens: 0

M. africana: 0

M. glacialis: 1

A espécie *M. glacialis* tem os espinhos dorsolaterais reduzidos ou ausentes (Clark, 1951), possivelmente representando uma condição autapomórfica do carácter. Os espinhos reduzidos surgem distintamente em indivíduos adultos.

5. Espinhos actinais

(0) Ausentes

(1) Presentes

A espécie *M. africana* pode ter um espinho actinal simulando a presença de um terceiro espinho inferomarginal (Wright et al., 2016), provavelmente representando um carácter autapomórfico.

6. Espinhos da placa adambulacral

(0) Linha dupla

(1) Uma só linha

A. rubens: (0)

M. glacialis: (1)

M. africana: (1)

Os espinhos da placa adambulacral foram registrados como ocorrendo numa ou duas fileiras (Wright, 2013; Wright et al., 2016). Os espinhos ambulacrais de *M. glacialis* e de *M. africana* estão organizados numa única fileira regular (Marine Species Identification Portal, 2023). Na espécie *A. rubens*, o sulco ambulacral é delimitado e protegido lateralmente por duas fileiras de espinhos ambulacrais calcários móveis que são capazes de se fechar sobre o sulco.

7. Tipos de pedicelários ao redor dos espinhos

(0) Retos e cruzados

(1) Apenas cruzados

A. rubens: (0)

M. glacialis: (1)

M. africana: (1)

As espécies *M. glacialis* e *M. africana* têm apenas pedicelários cruzados à volta dos espinhos marginais e abactinais, agrupados em estruturas móveis (as rosetas) (Lambert et al., 1984; Wright et al., 2016). A espécie *A. rubens* tem os espinhos maiores por vezes rodeados por feixes de pedicelários retos e cruzados (Madeira et al., 2019; (MarLIN - The Marine Life Information Network - Home, 2023).

8. Presença de pedicelários entre os espinhos na superfície dorsal

(0) Presentes

(1) Ausentes

A. rubens: (0)

M. glacialis: (1)

M. africana: (1)

A espécie *A. rubens* apresenta dois tipos de pedicelários: os pedicelários retos, que se encontram dispersos na pele; e os pedicelários cruzados, que se encontram em tufo ou grinaldas ao redor dos grandes espinhos dorsais (Sladen, 1889; Verrill, 1914). *Marthasterias* spp. têm pedicelários cruzados apenas ao redor dos espinhos (Jullien, 1878; Madeira et al., 2019).