



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA**

JULIANO GUERRA DE CASTRO

**VARIAÇÃO MORFOLÓGICA DA CONCHA DE BIVALVES DO GÊNERO *DONAX*
(BIVALVIA: DONACIDAE) DO NORDESTE BRASILEIRO**

São Cristóvão/SE

2023

JULIANO GUERRA DE CASTRO

**VARIAÇÃO MORFOLÓGICA DA CONCHA DE BIVALVES DO GÊNERO *DONAX*
(BIVALVIA: DONACIDAE) DO NORDESTE BRASILEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Biologia da Universidade
Federal de Sergipe, como requisito parcial para
obtenção de grau de bacharel em Ciências
Biológicas.

Orientadora: Prof. Dra. Ana Paula Siqueira
Dornellas.

São Cristóvão/SE

2023

A Fernando Amaral da Silveira, o famoso Fernandão, que um pouco da sua
sistemática de abelhas viva na minha de moluscos

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, em especial à minha mãe e à minha falecida avó, que me acompanharam durante a longa trajetória da minha graduação e me deram todo o apoio possível para que eu pudesse chegar até onde estou hoje. Sou grato também a todos os amigos e colegas que me apoiaram ao longo dos anos, tanto nos estudos quanto a lidar com minha própria saúde mental e a não desistir de tudo o que é importante pra mim. Obrigado principalmente à Kemily Velames, Danniely Patricia, Dylwania Morais, Fernanda Souza, Esther Evelyn, Amanda Cristina, Stephany Guerra, César Manduca, Erik Francisco, Marina Andrade, Júlia Muzetti, Júlia de Paula, Caizin, Karen Kanda e Karen Barcelos.

Agradeço ao Laboratório de Entomologia e Parasitologia Tropical (LEPaT) da UFS por carinhosamente permitirem o uso dos equipamentos necessários para tirar as fotos utilizadas neste trabalho e a Luciana Oliveira, por me ensinar a utilizá-los. Agradeço também ao Museu de Zoologia da Universidade de São Paulo e ao Laboratório de Invertebrados Marinhos da Universidade Federal do Ceará pelos empréstimos das coleções, e a Paul Callomon da Academia de Ciências Naturais de Drexel, Filadélfia, por providenciar as fotos dos *Donax vellicatus*. Obrigado a Gabrielle Santos e Geovanna Santos pela ajuda com as fotografias dos donacídeos e por todo o companheirismo ao longo do trabalho no InverMar.

Por fim, agradeço a todos os docentes que contribuíram para minha formação, em especial à minha orientadora Ana Paula por toda confiança e apoio ao longo do desenvolvimento desse projeto e do ano em que atuei como monitor de Invertebrados, o que fortaleceu não só meu amor por esses animais maravilhosos mas também pela educação científica, pela busca de formas para compartilhar esse amor com os outros. Agradeço também ao professor Pablo Ariel, pela ajuda com os programas morfométricos e estatísticos utilizados, além de pela execução das análises K-mean; à Irene Teixeira pela ajuda na execução da Análise Geral de Procrustes e aos professores Flávio Dias Passos (UNICAMP) e Rodrigo César Marques (UFVJM) por me acompanharem e aconselharem ao longo do trabalho.

RESUMO

Bivalves do gênero *Donax* L., 1778 habitam regiões entremarés de praias tropicais. O gênero possui 90 espécies descritas, sendo que quatro ocorrem na costa brasileira, *Donax denticulatus* L., 1758, desde o estado do Pará a Alagoas, *D. striatus* L., 1767, do Maranhão ao Rio Grande do Norte, *D. hanleyanus* Philippi, 1847 e *D. gemmula* Morrison, 1971 ambos presentes nas regiões sul e sudeste, do Espírito Santo ao Rio Grande do Sul. A espécie *D. gemmula* possui também um registro para a região Nordeste, no estado do Ceará. A espécie *D. vellicatus* Reeve, 1855 foi descrita uma única vez para o Brasil, no Rio Grande do Norte, em 1971. As espécies de *Donax* presentes no litoral de Sergipe nunca foram estudadas em relação à sua taxonomia. Dessa maneira, fizemos uma análise conquiliológica e de morfometria geométrica para comparar a forma de donacídeos do estado de Sergipe e *Donax gemmula* de São Paulo, espécie com a qual eles mais se assemelhavam, com o intuito de identificar os táxons dessa região. Analisamos conchas de 88 indivíduos do gênero *Donax* da Coleção de Zoologia da Universidade Federal de Sergipe, coletados em três pontos distintos do litoral da cidade de Aracaju, na praia da Atalaia (AT), sul do Mosqueiro (SM) e norte do Mosqueiro (NM) além de 59 *Donax gemmula* da Coleção de Malacologia do Museu de Zoologia da Universidade de São Paulo, provenientes das cidades de Santos-SP (SA) e São Sebastião-SP (SB). Os espécimes foram analisados em relação às suas conchas e, posteriormente, a valva esquerda foi utilizada para a análise de morfometria geométrica. A análise conquiliológica indicou que os espécimes da população SM pertencem à espécie *Donax gemmula*, mas os espécimes da praia da AT e do NM não puderam ser identificados por falta de características diagnósticas conhecidas para as espécies descritas. Os resultados estatísticos da morfometria também foram compatíveis com os da análise conquiliológica. Na Análise de Componentes Principais (PCA) foi observada uma alta sobreposição entre os espécimes do SM e os *D. gemmula* de São Paulo. Entretanto, os espécimes da AT e do NM apresentaram pouca e nenhuma sobreposição com as demais populações, respectivamente. As distâncias de Procrustes e de Mahalanobis entre todos os pares de populações foram significativamente diferentes. A regressão entre as coordenadas de Procrustes e o do tamanho de centroide revelou uma relação alométrica entre tamanho e forma. As análises K-means indicaram a presença de dois ou três tipos morfológicos distintos entre todas as populações e separaram as espécies da AT e do NM da maioria dos demais indivíduos, tanto para $k = 2$ quanto para $k = 3$. Dessa maneira, concluímos que *D. gemmula* também ocorre em mais um local do litoral nordestino, o que reforça a hipótese de que sua distribuição seja contínua ao longo do litoral brasileiro. Os indivíduos da Atalaia e do norte do Mosqueiro são morfologicamente muito distintos dos demais *Donax* e possivelmente refletem uma grande plasticidade fenotípica latitudinal de *D. vellicatus* ou pertencem a uma nova espécie. Mais estudos, incluindo espécies do Caribe, são necessários para confirmar essas hipóteses.

Palavras-chave: Donacídeos, Sergipe, Morfometria Geométrica, taxonomia.

ABSTRACT

The genus *Donax* L., 1778 comprises bivalves inhabiting intertidal regions of tropical beaches. The genus has 90 described species, four of them occurring on the Brazilian coast, *Donax denticulatus* L., 1758, from the state of Pará to Alagoas, *D. striatus* L., 1767, from Maranhão to Rio Grande do Norte, *D. hanleyanus* Philippi, 1847 and *D. gemmula* Morrison, 1971 both present in the southern and southeastern regions from Espírito Santo to Rio Grande do Sul. *D. gemmula* is also documented in the Northeast region, specifically in the state of Ceará. *D. vellicatus* Reeve, 1855 has one record for the Brazilian coast, for Rio Grande do Norte, in 1971. The *Donax* species found along the coast of Sergipe have never undergone taxonomic investigation. Consequently, we performed a conchological analysis and geometric morphometric approaches to compare the morphology of donacids in Sergipe with *Donax gemmula* from São Paulo, species with which they resembled the most, aiming to identify the taxa present in Sergipe. We analyzed shells from 88 specimens of the *Donax* genus deposited at the Coleção de Zoologia da Universidade Federal de Sergipe, collected at three distinct location along the Aracaju coast, at Atalaia's Beach (AT), southern part of Mosqueiro (SM) and northern part of Mosqueiro (NM). Additionally, we examined 59 specimens of *Donax gemmula* from Coleção de Malacologia do Museu de Zoologia da Universidade de São Paulo, originating from Santos-SP (SA) and São Sebastião-SP (SB) Brazil. Our analysis initially focused on shell characteristics, followed by a subsequent geometric morphometric analysis of the left valve. The conchological analysis revealed that individuals from the southern Mosqueiro population belong to the *Donax gemmula* species. However, the specimens from AT and NM could not be conclusively identified due to the absence of known diagnostic features for the described species. The statistical results from the morphometric analysis aligned with those from the conchological study. In the Principal Components Analysis (PCA), we observed a significant overlap between specimens from southern Mosqueiro and *D. gemmula* from São Paulo. However, the specimens from the AT and the NM exhibited minimal to no overlap with other populations, respectively. The Procrustes and Mahalanobis distances between all population pairs were notably distinct. Regression analysis of Procrustes coordinates against centroid size revealed an allometric relationship between size and shape. K-means analysis indicated the presence of two or three distinct morphotypes among all populations, effectively distinguishing the Atalaia Beach and northern Mosqueiro from the majority of other individuals, for both $k = 2$ and $k = 3$. Consequently, we deduce that *D. gemmula* is also present in another location along the northeastern coast, reinforcing the hypothesis that its distribution is continuous along the Brazilian coast. The specimens from AT and NM region exhibit striking morphological differences from other *Donax* species and may potentially represent a significant latitudinal phenotypic plasticity within *D. vellicatus* or belong to a new species. Further research, including the study of Caribbean species, is imperative to validate these hypotheses.

Keywords: Donacids, Sergipe, Geometric Morphometrics, taxonomy.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Face interna da valva esquerda de um donacídeo da CZUFS (CAA = Cicatriz do músculo adutor anterior; CAP = Cicatriz do músculo adutor posterior; LP = Linha palial; MA = Margem anterior; MD = Margem dorsal; MP = Margem posterior; MV = Margem Ventral; SP = Seio palial; U = Umbo).....12
- Figura 2. Distribuição geográfica das espécies de *Donax* no Brasil. Modificado de BARROSO *et al.* 2013.....13
- Figura 3. **A-D**, *Donax hanleyanus* (MZSP 022091, Caravelas - BA); **E-H**, *Donax striatus* (MZSP 096067, Porto do Mangue - RN); **I-T**, *Donax* sp. (CZUFS, Aracaju - SE, Atalaia), **U-AF**, *Donax* sp. (CZUFS, Aracaju - SE, norte do Mosqueiro).....15
- Figura 4. **A-L**, *Donax gemmula* (MZSP 026213, Santos - SP); **M-X**, *Donax gemmula* (MZSP 040943, São Sebastião - SP); **AA-AL**, *Donax* sp. (CZUFS, Aracaju - SE, sul do Mosqueiro).....16
- Figura 5. **A-D**, *Donax vellicatus* (ANSP 300325, Areia Branca - RN); **E-H**, *Donax* sp. (ANSP 244133, Maceió - AL).....16
- Figura 6. Face interna da valva esquerda de um donacídeo da CZUFS. Os 8 *landmarks* utilizados nas análises morfométricas estão marcados em pontos vermelhos. 1 - Umbo; 2 - Ponto extremo anterior; 3 - Ponto extremo posterior; 4 - Ponto mais ventral da cicatriz do músculo adutor posterior; 5- Intersecção do seio palial e da cicatriz do músculo adutor posterior; 6 - Ponto mais anterior do seio palial; 7 - Intersecção da linha palial e do seio palial; 8 - Intersecção da linha palial e da cicatriz do músculo adutor anterior. Os 80 *semilandmarks* utilizados estão uniformemente espaçados ao longo da margem ventral.....20
- Figura 7. Gráfico da Análise dos Componentes Principais (PCA) entre as populações estudadas (AT = Atalaia; NM = Norte do Mosqueiro; SA = Santos; SB = São Sebastião; SM = Sul do Mosqueiro). O eixo x é representado pelo Componente Principal 1 (PC1) e o eixo y pelo Componente Principal 2 (PC2). As elipses de confiança indicam áreas nas quais 90% dos indivíduos de cada população estão

localizados. Adjacentes ao gráfico encontram-se *wireframes* que representam as configurações de *landmarks* e *semilandmarks* nos extremos de cada eixo (em azul escuro) em relação à configuração média (em cinza).....23

Figura 8. Gráficos *lollipop* (em azul escuro) sobrepostos às grades de transformação (em azul claro) para os extremos (-0.1 e 0.1) dos eixos da PCA, o Componente Principal 1 (PC1) e o Componente Principal 2 (PC2). Os *landmarks* estão especificados em números vermelhos. Os gráficos *lollipop* mostram as direções das forças aplicadas na deformação a partir dos pontos anatômicos, resultantes do deslocamento de cada ponto em relação aos demais, e as grades de transformação mostram as deformações resultantes em um plano cartesiano ficcional nos quais os pontos estariam distribuídos.....24

Figura 9. Gráfico da Análise das Variáveis Canônicas (CVA) entre as populações estudadas (AT = Atalaia; NM = Norte do Mosqueiro; SA = Santos; SB = São Sebastião; SM = Sul do Mosqueiro). O eixo x é representado pela Variável Canônica 1 (CV1) e o eixo y pela Variável Canônica 2 (CV2). As elipses de confiança indicam áreas nas quais 90% dos indivíduos de cada população estão localizados. Adjacentes ao gráfico encontram-se *wireframes* que representam as configurações de *landmarks* e *semilandmarks* nos extremos de cada eixo (em azul escuro) em relação à configuração média (em cinza).....25

Figura 10. Gráficos *lollipop* (em azul escuro) sobrepostos às grades de transformação (em azul claro) para os extremos dos eixos da CVA, a Variável Canônica 1 (CV1) e a Variável Canônica 2 (CV2). Acima de cada extremo estão representados os fatores de escala para o eixo em questão (-30 e 30 para CV1 e -20 e 20 para CV2). Os *landmarks* estão especificados em números vermelhos. Os gráficos *lollipop* mostram as direções das forças aplicadas na deformação a partir dos pontos anatômicos, resultantes do deslocamento de cada ponto em relação aos demais, e as grades de transformação mostram as deformações resultantes em um plano cartesiano ficcional nos quais os pontos estariam distribuídos.....26

Figura 11. Regressão linear entre a forma, medida multivariada das coordenadas de Procrustes representada pelo *regression score* no eixo y, e tamanho, representado pelo tamanho de centroide (CS), entre as populações (AT = Atalaia; NM = Norte do Mosqueiro; SA = Santos; SB = São Sebastião; SM = Sul do Mosqueiro). As elipses de confiança indicam áreas nas quais 90% dos indivíduos de cada população estão localizados.....28

Figura 12. Análise K-means feita a partir dos primeiros cinco PCs da PCA. A inércia (*inertia*) indica mudanças na variação dos dados, e k indica o número de agrupamentos. A curva acentuada (*elbow* ou cotovelo) indica o k em que há uma súbita desaceleração da inércia, o que sugere o possível melhor número de agrupamento para os dados.....29

Figura 13. Análise do valor de silhueta (*silhouette score*) para diferentes números de agrupamentos (k) relativos aos primeiros cinco PCs da PCA.....30

Figura 14. Diagrama de silhueta para números diferentes de agrupamentos (k). Indivíduos estão contidos nos grupos em que foram designados no K-means, em ordem decrescente de coeficiente de silhueta para cada grupo, de cima para baixo. A linha vermelha marca o valor de silhueta do k.....31

Figura 15. PCA com destaque aos grupos separados pelas análises K-means para k = 2. Grupo (a) destacado em azul e grupo (b) destacado em vermelho. As elipses de confiança indicam áreas nas quais 90% dos indivíduos de cada agrupamento estão localizados.....32

Figura 16. PCA com destaque aos grupos separados pelas análises K-means para k = 3. Grupo (a) destacado em azul, grupo (b) destacado em vermelho e grupo (c) destacado em verde. As elipses de confiança indicam áreas nas quais 90% dos indivíduos de cada agrupamento estão localizados.....32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Espécimes usados nas análises morfométricas.....	19
Tabela 2. Distâncias de Procrustes e de Mahalanobis entre as populações.....	27
Tabela 3. Análise de Variância (ANOVA) da forma (coordenadas de Procrustes) e tamanho (tamanho de centroide) entre as populações. Df = graus de liberdade; SS = soma das distâncias quadradas; MS = Média das SS.....	28
Tabela 4. Número de indivíduos de cada população designados aos agrupamentos gerados nas análises k-means para k = 2 e k = 3.....	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CZUFS - Coleção Zoológica da Universidade Federal de Sergipe

MZSP - Coleção do Museu de Zoologia da Universidade de São Paulo

CMPHRM-B - Coleção Malacológica Prof. Henry Ramos Matthews Série B

ANSP - Coleção de Malacologia da Academia de Ciências Naturais de Drexel, Filadélfia

NHM - Museu de História Natural de Londres

GPA - Análise Geral de Procrustes

PCA - Análise dos Componentes Principais

PCs - Componentes Principais

PC1 - Componente Principal 1

PC2 - Componente Principal 2

CVA - Análise de Variáveis Canônicas

CVs - Variáveis Canônicas

CV1 - Variável Canônica 1

CV2 - Variável Canônica 2

AT - Praia da Atalaia

NM - Norte do Mosqueiro

SM - Sul do Mosqueiro

SA - Santos-SP

SB - São Sebastião-SP

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	18
3. RESULTADOS.....	22
4. DISCUSSÃO.....	33
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	35
REFERÊNCIAS.....	36
APÊNDICES.....	39
APÊNDICE A.....	39
APÊNDICE B.....	40

1. INTRODUÇÃO

O gênero *Donax* Linnaeus, 1758 é composto por moluscos bivalves da família Donacidae e é encontrado principalmente em praias tropicais, nas zonas entremarés (MORRISON, 1971). Eles são utilizados como fonte de alimento, além de como iscas para pescaria, em diversas culturas (ANSELL, 1983; MONCADA, 2022). Esses bivalves pertencem à subclasse Autobranchia, caracterizada pela presença de brânquias hipertrofiadas, utilizadas não apenas para a respiração, mas também para a filtração de matéria orgânica em suspensão na água para obtenção alimento (BIELER *et al.*, 2014; GONZÁLEZ *et al.* 2015). Estão agrupados no clado Heterodonta, possuem conchas não-nacaradas, lamelares cruzadas ou complexas, com dois dentes cardinais adjacentes ao umbo e dentes laterais na região posterior e anterior da charneira (NEWELL, 1965; GONZÁLEZ, *et al.* 2015). Donacidae pertence à superfamília Tellinoidea, que contempla bivalves com um pé bem desenvolvido, uma ampla abertura do manto e a presença de um músculo cruciforme associado a um órgão sensorial (MARQUES, 2022). Esse órgão está relacionado à percepção mecânica do meio e, em *Donax*, não se abre na cavidade sifonal (PASSOS & DOMANESCHI, 2004).

Os donacídeos são filtradores e ancoram-se nos primeiros centímetros do substrato por meio de um largo pé muscular, enquanto mantém seus sifões, um inalante e um exalante, não fusionados, expostos (ANSELL, 1983; MORRISON, 1971; PASSOS & DOMANESCHI, 2004). Algumas espécies, como *Donax denticulatus*, migram com a maré, de forma que avançam para mais perto do litoral com as marés cheias e retrocedem com as marés baixas (MORRISON, 1971). Esse padrão é mais evidente em praias dissipativas e intermediárias, nas quais há uma forte ação de ondas ao longo da faixa de areia, com pouca ou nenhuma interrupção do seu avanço por rochas ou barreiras (NEVES & BEMVENUTI, 2009). Outras espécies, como *D. striatus* e *D. gemmula* mantêm-se aproximadamente no nível da região entremarés, sem migração (MORRISON, 1971; BARROSO *et al.*, 2013). Neves & Bemvenuti (2009) ressaltam a importância de estudar a macrofauna bentônica dos ambientes costeiros, visto que eles estão sujeitos a crescentes impactos antrópicos. Estudos relacionados a impactos ambientais sugerem que

algumas espécies de *Donax* são bioindicadores de poluição costeira, metais pesados e dos efeitos das mudanças climáticas (Ansell, 1983; Moncada, 2022).

A concha dos donacídeos possui formato triangular, inequilateral, com o lado anterior mais alongado e o posterior mais curto e truncado, a margem dorsal é retilínea e a ventral é ligeiramente curva, o umbo é opistógiro, ou seja, voltado ao sentido posterior; em sua face interna, destacam-se as cicatrizes dos músculos adutores, fundidas às cicatrizes dos músculos retratores do pé, a linha palial conspícua entre os músculos adutores posterior e anterior, e um amplo seio palial (Figura 1) (MORRISON, 1971; PASSOS & DOMANESCHI, 2004; SIGNORELLI & PRINTRAKOON, 2020).

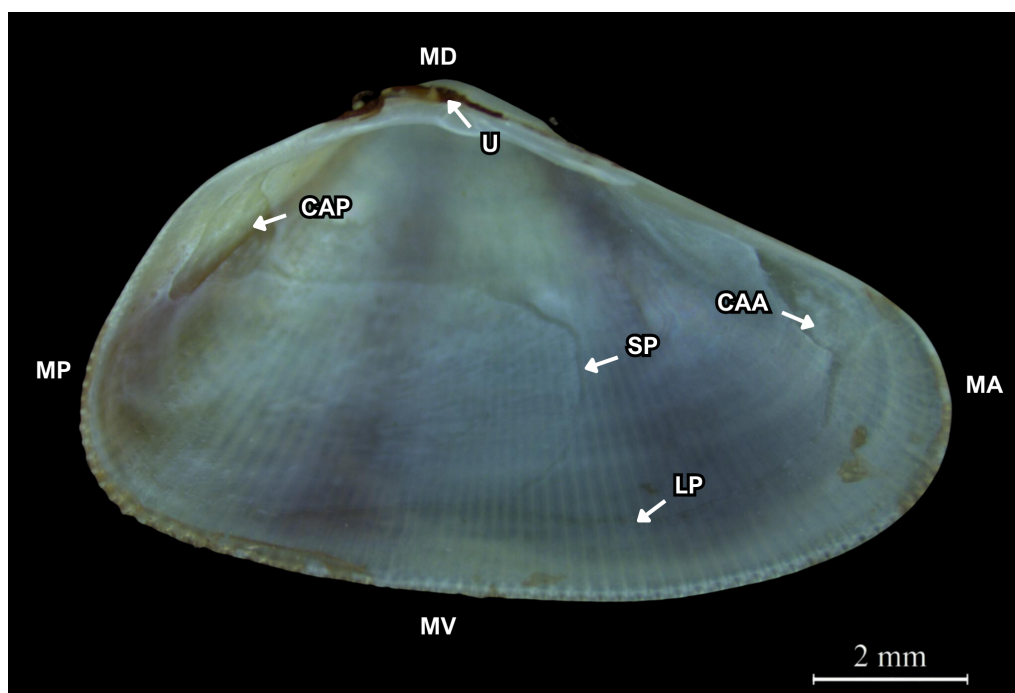


Figura 1. Face interna da valva esquerda de um donacídeo da CZUFS (CAA = Cicatriz do músculo adutor anterior; CAP = Cicatriz do músculo adutor posterior; LP = Linha palial; MA = Margem anterior; MD = Margem dorsal; MP = Margem posterior; MV = Margem Ventral; SP = Seio palial; U = Umbo).

O gênero contém, atualmente, 90 espécies descritas (MONCADA *et al.*, 2022) dentre as quais quatro ocorrem na costa brasileira, *Donax denticulatus* L., 1758, desde o estado do Pará a Alagoas, *D. striatus* L., 1767, do Maranhão ao Rio Grande do Norte, *D. hanleyanus* Philippi, 1847 e *D. gemmula* Morrison, 1971 ambos presentes nas regiões sul e sudeste, do Espírito Santo ao Rio Grande do Sul (RIOS,

2009) (Figura 2). Morrison (1971) relata a presença de *D. vellicatus* Reeve, 1855 no Rio Grande do Norte e de possíveis juvenis dessa espécie em Alagoas, porém não houve mais registros dela para a costa brasileira (BARROSO, *et al.* 2013). Essa espécie ocorre na América Central, de Belize ao Panamá e na ilha Trindade. Já a espécie *D. gemmula*, a qual ocorre no sudeste brasileiro, foi encontrada no nordeste, no estado do Ceará, município de Itapuí (BARROSO, *et al.* 2013). Consequentemente, duas hipóteses foram levantadas para explicar a tal ocorrência: a primeira é que ela teria sido introduzida por navios através da água de lastro; e a segunda é que a distribuição de *D. gemmula* seria, na verdade, contínua ao menos do Ceará ao Rio Grande do Sul (BARROSO, *et al.* 2013).

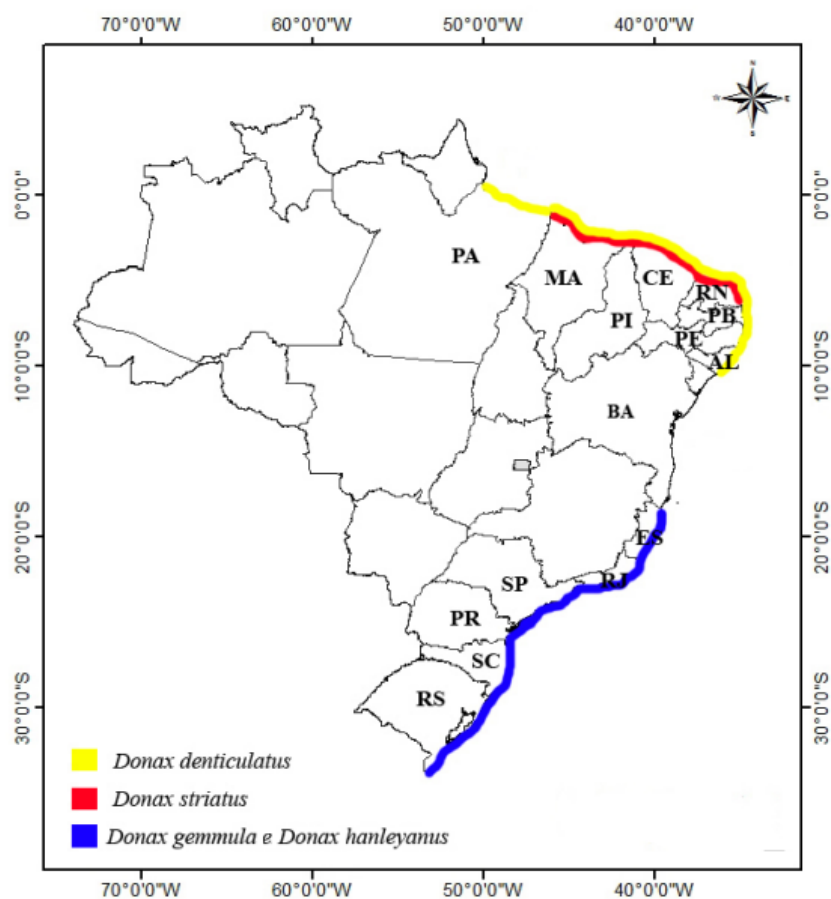


Figura 2. Distribuição geográfica das espécies de *Donax* no Brasil. Modificado de BARROSO *et al.* 2013.

A concha de *D. denticulatus* possui cerca de 18 mm de largura por 10 mm de altura, é esculpida radialmente por costelas largas, separadas por fendas pontuadas, e possui características linhas transversais na região central do escutelo, na superfície posterior de cada valva. *D. striatus* possui conchas grandes, de 26 x 18 mm, geralmente com cor creme e roxo azulado, e com umbo escurecido, a carena é repentina e a superfície posterior é levemente côncava (Figura 3). *D. hanleyanus* também possui valvas grandes (28 x 15 mm) com fracas estrias radiais, margem arredondada, exceto na região posterior, na qual assume formato estriado, robustas crenulações ao longo de toda a margem, cor branca e pode apresentar bandas radiais marrons (Figura 3). *D. gemmula*, por sua vez, apresenta as menores conchas para o gênero, com 6,5 x 4,8 mm (Holótipo, ANSP no. 244125, coletado na Praia do Cassino, no Rio Grande do Sul), possui uma carena abrupta, mas uniformemente arredondada, o que confere à concha um aspecto subgloboso e triangular ovalado, possui costelas radiais fracas, mais conspícuas próximo à carena, apresentam coloração branca com faixas púrpuras trirradiais, mais evidentes no interior da concha, e seio palial relativamente longo e largo (MORRISON, 1971; PASSOS & DOMANESCHI, 2004; RIOS, 2009; BARROSO *et al.*, 2013) (Figura 4).

A literatura científica sobre *D. vellicatus* é escassa. A espécie possui valvas relativamente longas para o gênero, estriadas, com reentrâncias relativamente próximas, cor branca ou acinzentada, arroxeadas nos umbos, com o lado posterior abruptamente truncado e contraído na margem (REEVE, 1855) (Figura 5). Seu seio palial é menor que os de outros *Donax*, menos da metade da distância entre as cicatrizes dos músculos adutores (MORRISON, 1971) e a sua marcante margem ventral sinuosa corresponde a uma variação também visível em outras espécies, como *D. striatus* (SOWERBY, 1855). Os síntipos dessa espécie estão no Museu de História Natural de Londres (NHM no. 1900.2.13.5 e NHM no. 1912.6.416) e sua localidade é indeterminada. Contudo, sua localidade tipo foi designada para Rio Grande do Norte por Morrison (1971) com base em espécimes depositados na Academia de Ciências Naturais de Drexel, Filadélfia (ANSP no. 300325) com os quais se assemelham morfologicamente (Fig. 5 A-D). Morrison (1971) também classificou espécimes de Alagoas (ANSP no. 244133) como possíveis juvenis de *D. vellicatus* (Fig. 5, E-H).

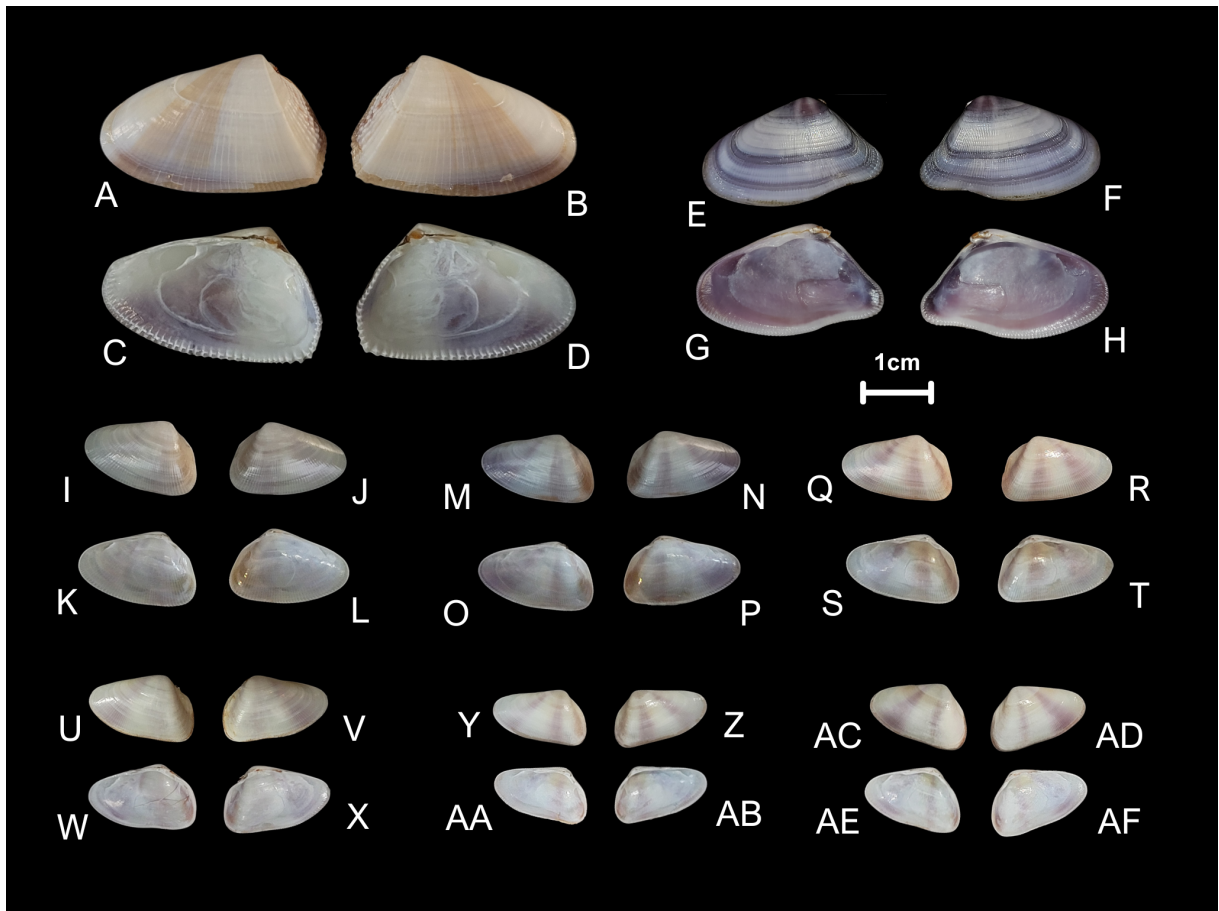


Figura 3. **A-D**, *Donax hanleyanus* (MZSP 022091, Caravelas - BA); **E-H**, *Donax striatus* (MZSP 096067, Porto do Mangue - RN); **I-T**, *Donax* sp. (CZUFS, Aracaju - SE, Atalaia), **U-AF**, *Donax* sp. (CZUFS, Aracaju - SE, norte do Mosqueiro).

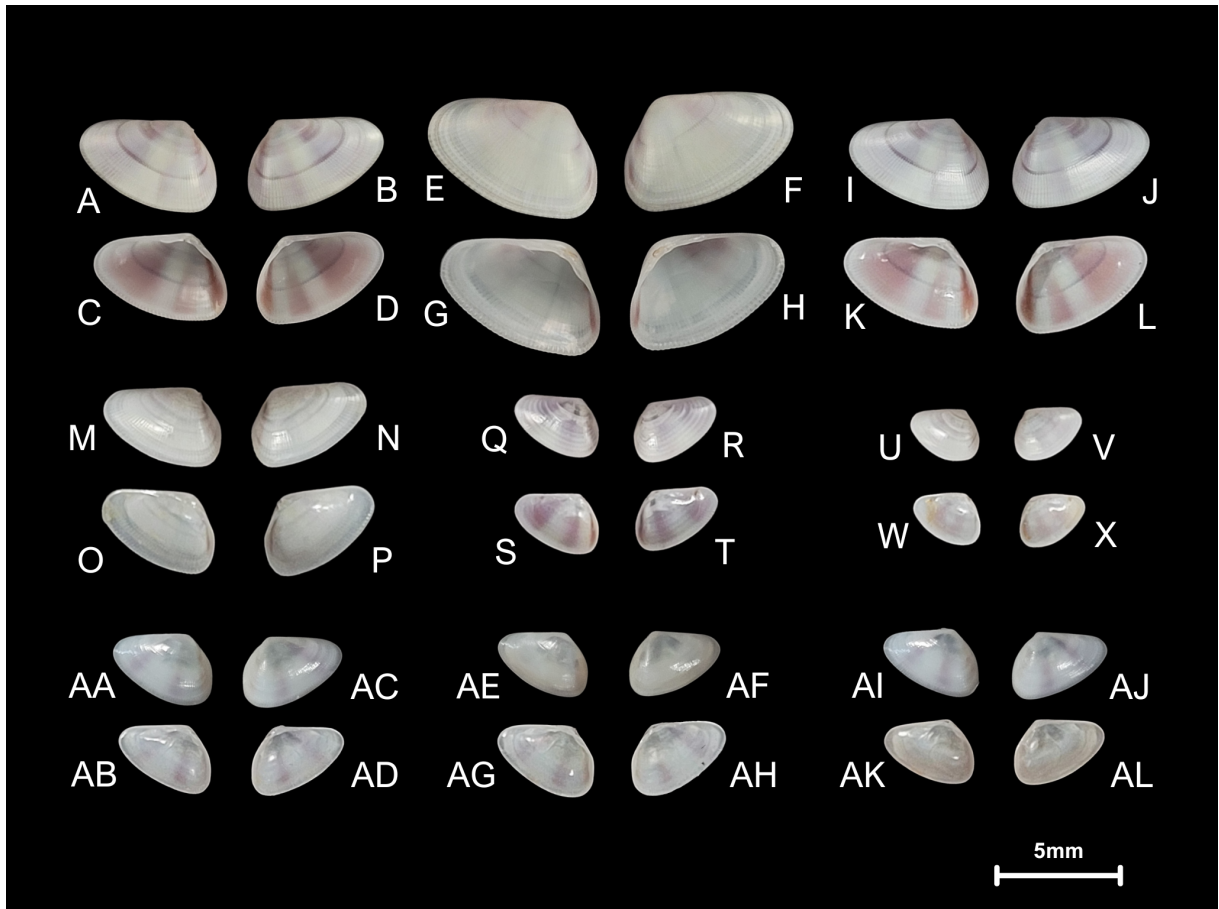


Figura 4. A-L, *Donax gemmula* (MZSP 026213, Santos - SP); M-X, *Donax gemmula* (MZSP 040943, São Sebastião - SP); AA-AL, *Donax* sp. (CZUFS, Aracaju - SE, sul do Mosqueiro).

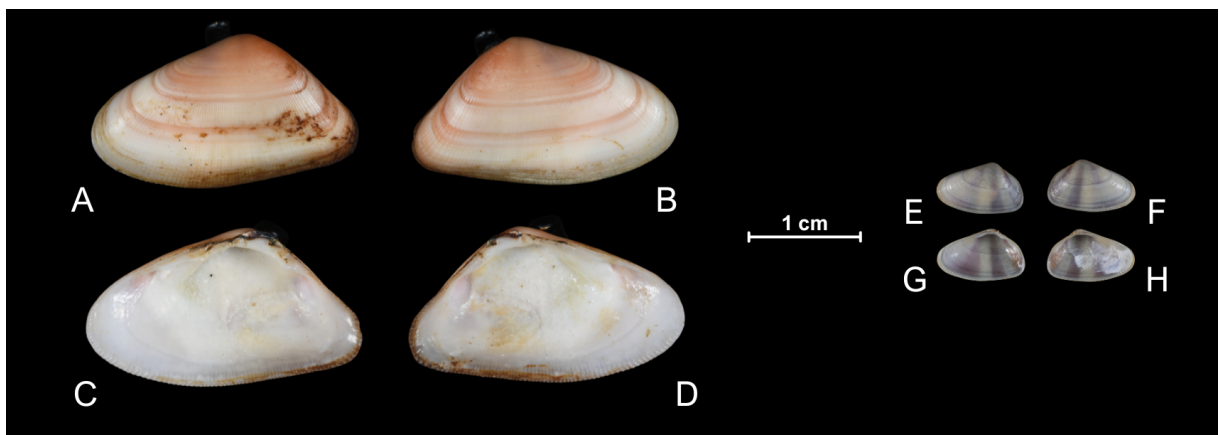


Figura 5. A-D, *Donax vellicatus* (ANSP 300325, Areia Branca - RN); E-H, *Donax* sp. (ANSP 244133, Maceió - AL).

Conchas são um atributo taxonômico muito utilizado para a classificação de bivalves, principalmente para diferenciação de gêneros e espécies (BIELER *et al.*, 2013). Contudo, a presença de diversos caracteres contínuos, como o contorno da concha, a angulação da carena e a altura e largura do seio palial, pode se tornar um empecilho para a classificação e resultar em subjetividade, erros de identificação e na criação de vários sinônimos para as mesmas espécies (DAPAR & TABUGO, 2018; MARINHO & ARRUDA, 2021; SIGNORELLI & PRINTRAKOON, 2022).

A morfometria geométrica surgiu na década de 90 como uma abordagem da Biometria capaz de trabalhar com múltiplas variáveis e de reproduzir graficamente diferenças na forma. Essa abordagem se baseia na atribuição de coordenadas a pontos homólogos da superfície de um organismo, e na comparação da variação desses pontos em um conjunto de organismos, em relação a uma configuração de referência (ÁSTUA, 2003, MARINHO & ARRUDA, 2021). A morfometria geométrica pode ser utilizada para casos em que se é inviável recuperar dados moleculares de um organismo, como em espécimes fixados em coleções há décadas (MARQUES, 2022), mas também pode ser utilizada em conjunto com abordagens moleculares para aumentar a precisão dos estudos taxonômicos (MARQUES, 2022; SIGNORELLI & PRINTRAKOON, 2022).

Essa metodologia tem sido utilizada com sucesso para o estudo de bivalves nos últimos anos. Dapar & Tabugo (2018) utilizaram o método da Análise de Fourier Elíptica (EFA) para detectar sutis diferenças no contorno da concha de bivalves da família Veneridae Rafinesque, 1815. Marinho & Arruda (2021) utilizaram a morfometria geométrica para estudar caracteres de três espécies da família Tellinidae Blainville, 1814, e concluíram que a abordagem foi eficaz, principalmente para o estudo de caracteres contínuos, e que pode ser utilizada para aprimorar a identificação taxonômica de bivalves e para comparar hábitos de vida de diferentes espécies. Marques (2021) utilizou a mesma abordagem para diferenciar populações do bivalve dulcícola *Anodontites trapesialis* (Lamarck, 1819) em diferentes bacias hidrográficas brasileiras. Marques *et al.* (2022) utilizaram uma abordagem mista de morfometria geométrica e morfologia para realizar um estudo filogenético do gênero *Eurytellina* Fischer, 1887. Printragoon *et al.* (2022) utilizaram tanto EFA quanto

análises moleculares para explorar as relações filogenéticas de donacídeos da Tailândia.

O objetivo deste trabalho foi realizar uma análise minuciosa das espécies pertencentes ao gênero *Donax* que ocorrem no litoral sergipano, as quais nunca foram submetidas a estudos taxonômicos. Essa análise foi conduzida por meio de estudos conchiliológicos e da aplicação da morfometria geométrica, com o intuito de preencher parte da lacuna existente no conhecimento sobre as espécies que ocorrem ao longo da costa brasileira. Dessa forma, buscamos contribuir para a real distribuição dessas espécies e aprimorar nosso entendimento sobre a biodiversidade costeira do Brasil.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As análises conchiliológicas incluíram *Donax* sp. da Coleção de Zoologia da Universidade Federal de Sergipe (CZUFS), coletados no litoral da cidade de Aracaju-SE, na praia da Atalaia e no Mosqueiro, além de donacídeos depositados na Coleção de Malacologia do Museu de Zoologia da Universidade de São Paulo (MZSP), da Coleção Malacológica Prof. Henry Ramos Matthews Série B da Universidade Federal do Ceará (CMPHRM-B), da Coleção de Malacologia da Academia de Ciências Naturais de Drexel, Filadélfia (ANSP) e por meio de de coletas realizadas na praia do Mosqueiro em Aracaju, em fevereiro de 2023 (Figuras 3, 4 e 5). A análise incluiu exemplares de *Donax gemmula* dos estados de Ceará e São Paulo, além de *Donax striatus* do Pará, Rio Grande do Norte e Ceará, *Donax hanleyanus* da Bahia e de São Paulo e *Donax vellicatus* do Rio Grande do Norte. As conchas foram analisadas por meio de bibliografias específicas de bivalves, são elas: Newell (1965), Morrison (1971), Ansell (1983), Rios (2009) e Barroso (2013).

Para as análises morfométricas, foram selecionados aleatoriamente 88 espécimes do gênero *Donax* da CZUFS e 59 *Donax gemmula* da MZSP, separados segundo seus locais de coleta, todos praias dissipativas, de acordo com a Tabela 1. As análises incluíram apenas *D. gemmula* devido à sua similaridade morfológica

com os *Donax* sp. de Sergipe e à grande diferença de tamanho e forma de ambas espécies com relação aos demais *Donax* brasileiros, visível *a priori*.

Tabela 1. Espécimes usados nas análises morfométricas

Estado	Local de Coleta	Número de Indivíduos
Sergipe	Praia da Atalaia	30
	Norte do Mosqueiro	29
	Sul do Mosqueiro	29
São Paulo	Santos - Praia de Canal 1	30
	São Sebastião - Praia de Barequeçaba	29

A valva direita e as partes moles foram retiradas e a valva esquerda foi limpa e seca ao ar livre. Após a limpeza, a face interna da valva esquerda dos animais foi fotografada utilizando uma lupa Leica S8APO acoplada a uma câmera DMC2900. Essa orientação foi escolhida por permitir a melhor visualização de estruturas importantes, como as cicatrizes dos músculos adutores anterior e posterior, a linha e o seio palial. Foram definidos 8 landmarks e 80 semilandmarks para as análises morfométricas (Figura 6).

Os *landmarks* 5, 7 e 8 são caracterizados como do Tipo 1 segundo a classificação de Bookstein (1991) pois correspondem à justaposição de tecidos, ou consequências dessa justaposição, como cicatrizes. Já os demais *landmarks* correspondem ao Tipo 2 na classificação de Bookstein, pois são pontos de máxima curvatura. Esses pontos são importantes ao se analisar processos de crescimento que ocorrem por deposição nas margens (ZELDITH, 2001) o que os torna valiosos no estudo da forma da concha de bivalves.

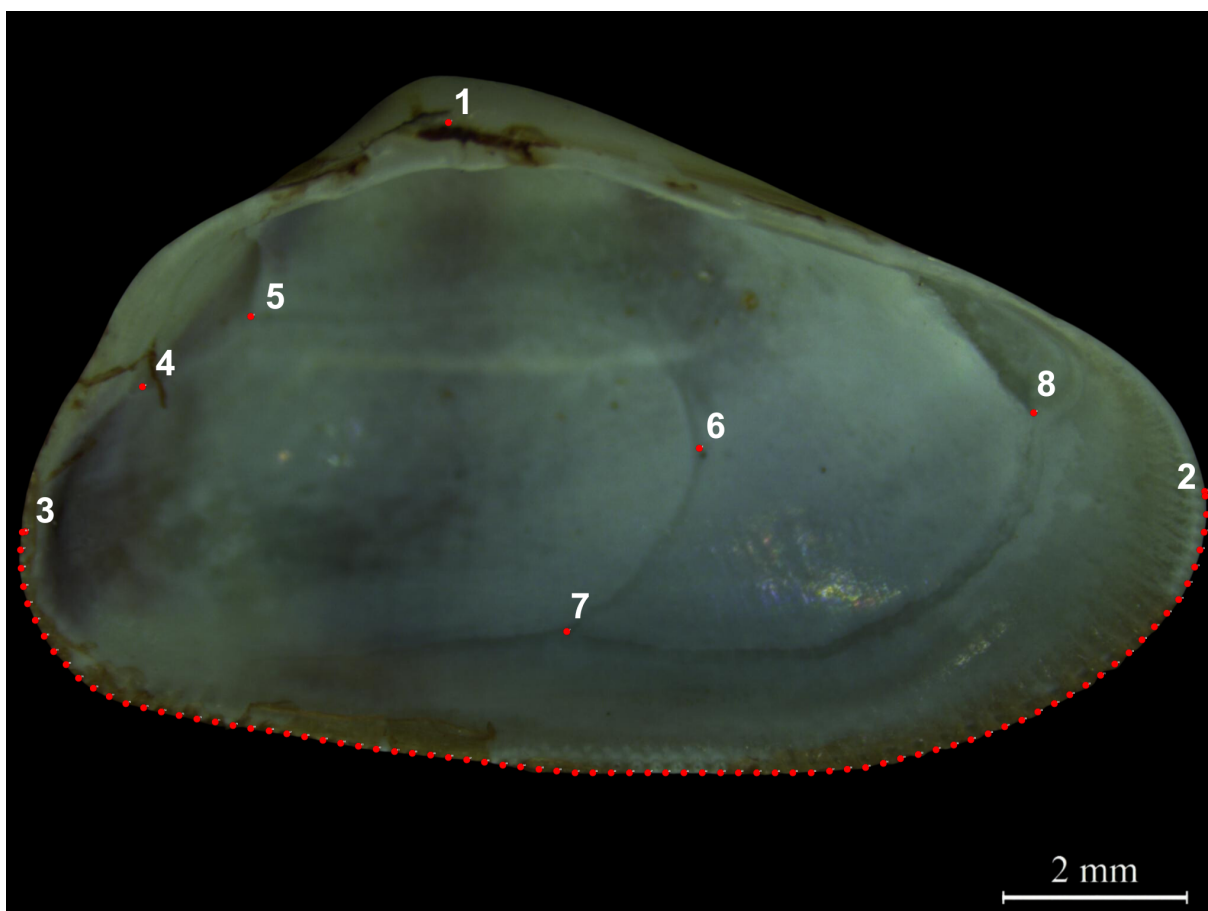


Figura 6. Face interna da valva esquerda de um donacídeo da CZUFS. Os 8 *landmarks* utilizados nas análises morfométricas estão marcados em pontos vermelhos. 1 - Umbo; 2 - Ponto extremo anterior; 3 - Ponto extremo posterior; 4 - Ponto mais ventral da cicatriz do músculo adutor posterior; 5 - Intersecção do seio palial e da cicatriz do músculo adutor posterior; 6 - Ponto mais anterior do seio palial; 7 - Intersecção da linha palial e do seio palial; 8 - Intersecção da linha palial e da cicatriz do músculo adutor anterior. Os 80 *semilandmarks* utilizados estão uniformemente espaçados ao longo da margem ventral.

Os *semilandmarks*, diferentemente dos marcos anatômicos tradicionais, não são posicionados em locais discretos predefinidos na concha, mas sim distribuídos de forma arbitrária ao longo de uma curva. Consequentemente, a comparação entre os diferentes espécimes baseia-se na análise da própria curva, ao invés da avaliação individual das posições dos *semilandmarks* (ZELDITH, 2001).

Os *landmarks* e *semilandmarks* foram digitalizados por meio do software TpsDig2 v.2.32 (ROHLF *et al.*, 2004), que gera arquivos no formato “.tps” com as coordenadas dos pontos nos eixos x e y das imagens. Esses dados foram utilizados no programa R v.4.2.1 (R Core Team, 2022), com o uso do pacote *geomorph* (BAKEN *et al.*, 2021; ADAMS *et al.*, 2022), para realização da Análise Geral de

Procrustes (GPA). A GPA é um processo que visa estimar a forma média dos pontos no conjunto de dados, ao minimizar as diferenças de posição, tamanho e rotação (ou seja, as que não são de forma) entre as configurações (ZELDITH, 2004). Para isso, as configurações são centralizadas na origem, seu tamanho de centroide, medida multivariada de tamanho que corresponde à raiz da soma do quadrado das distâncias entre cada ponto e o ponto central da forma, é transformado em 1 e as configurações são rotacionadas em relação a uma configuração de referência até que uma sobreposição ótima seja alcançada (ÁSTUA, 2003).

A Análise dos Componentes Principais (PCA) e a Análise das Variáveis Canônicas (CVA), bem como as distâncias de Procrustes e de Mahalanobis, os *wireframes*, os gráficos *lollipop* e as grades de transformação foram feitos no programa MorphoJ v.1.07a (KLINGENBERG, 2011). A CVA é um método estatístico que considera cada indivíduo como pertencente a um grupo pré-selecionado e escala os eixos de acordo com as diferenças entre os grupos (ZELDITH, 2004). Também foi feita uma regressão linear entre as coordenadas de Procrustes e o tamanho de centroide para comparar a influência do tamanho na forma.

Uma análise k-means foi realizada no Google Colab a partir dos primeiros cinco PCs com o intuito de determinar estatisticamente o número de tipos mórfoicos presentes em todas as populações. Esse tipo de análise é comumente utilizado na Ciência de Dados, em processos de *machine learning* para treinar computadores a reconhecer padrões (GÉRON, 2019). Ao contrário da CVA, o k-means não assume as populações dos indivíduos *a priori*, e sim determina o número de populações (k) que melhor explica os dados a partir da diferença de variação (denominada Inertia, ou Inércia) entre diferentes valores de k (GÉRON, 2019). A inércia sempre diminui com um maior valor de k, porém esse decréscimo ocorre mais lentamente a partir de um determinado k visível graficamente como uma curva acentuada, denominada “*elbow*” ou “cotovelo”, que indica o melhor número de agrupamentos para o conjunto de dados.

Uma Análise de Variância (ANOVA) foi feita no programa R v.4.2.1 (R Core Team, 2022), com o uso do pacote *geomorph* (BAKEN *et al.*, 2021; ADAMS *et al.*, 2022) para avaliar a correlação da localidade das populações com o tamanho e a forma dos indivíduos. As artes foram feitas no Canva v.1.71.

3. RESULTADOS

A análise conquiliológica indicou que os espécimes da população do SM pertencem à espécie *Donax gemmula*, pois são caracterizados por apresentarem conchas relativamente pequenas para o gênero (média 4,66 mm largura x 3,13 mm altura), faixas púrpuras trirradiais, concha subglobosa com carena uniformemente arredondada e crenulações uniformes ao longo da margem ventral (MORRISON, 1971; RIOS, 2009).

Os indivíduos da AT e do NM não foram identificados como nenhuma espécie de *Donax* descrita para o Brasil. Esses indivíduos são maiores (10,43 mm x 6,33 mm e 11,31 mm x 6,66 mm, respectivamente), e sua forma é mais alongada e apresenta uma evidente margem ventral sinuosa, em contraste com a forma mais truncada e com margem ventral mais convexa de *D. gemmula*. Além disso, eles são menores e apresentam conchas com uma carena uniformemente arredondada em contraste com *D. striatus*, *D. hanleyanus* e *D. denticulatus*, que são maiores e possuem carena quilhada. Esses indivíduos se assemelham mais com *D. vellicatus*, mas se diferenciam principalmente por serem menores (ANSP no. 300325 *D. vellicatus* com 23 x 13 mm), possuírem um largo seio palial e uma constrição mais larga na margem posterior, visível a partir de um ponto mais dorsal que em *D. vellicatus*, o que confere à valva um formato mais trapezoidal que cônico.

Os resultados da análise morfométrica são condizentes com a análise conquiliológica. Na Análise de Componentes Principais (PCA) foi observada uma alta sobreposição entre os espécimes do SM e ambas as populações de *D. gemmula* do sudeste. Os espécimes do NM e da AT apresentaram uma sobreposição razoável entre si e muito pouca ou razoável sobreposição com as demais populações, respectivamente (Figura 7).

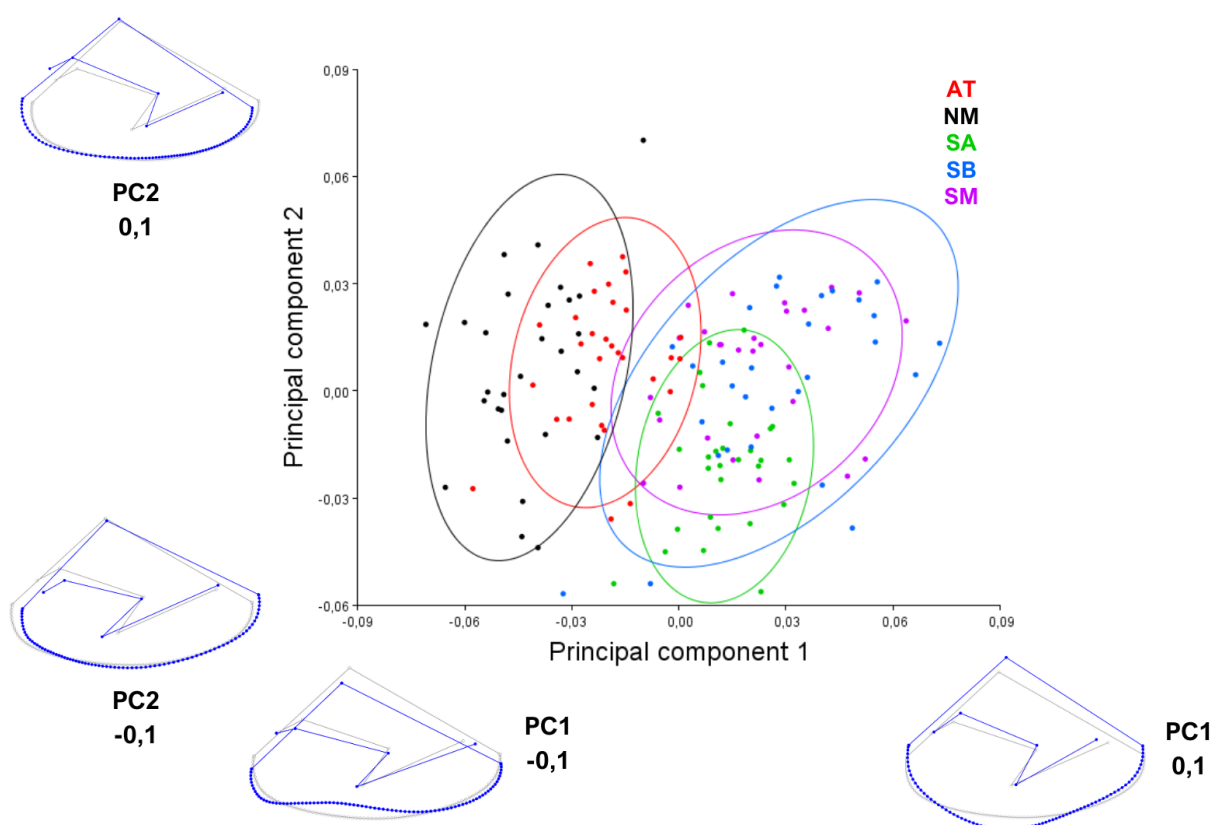


Figura 7. Gráfico da Análise dos Componentes Principais (PCA) entre as populações estudadas (AT = Atalaia; NM = Norte do Mosqueiro; SA = Santos; SB = São Sebastião; SM = Sul do Mosqueiro). O eixo x é representado pelo Componente Principal 1 (PC1) e o eixo y pelo Componente Principal 2 (PC2). As elipses de confiança indicam áreas nas quais 90% dos indivíduos de cada população estão localizados. Adjacentes ao gráfico encontram-se *wireframes* que representam as configurações de *landmarks* e *semilandmarks* nos extremos de cada eixo (em azul escuro) em relação à configuração média (em cinza).

O Componente Principal 1 (PC1) explica 44,152% da variação, principalmente pela posição antagônica da margem ventral mediana em relação às margens ventrais anterior e posterior, enquanto a mediana encurta, aproximando-se do centro, as outras se afastam, e vice-versa, o que descreve uma margem ventral sinuosa (Figura 8). Além disso, os pontos 1 e 5 aproximam-se ou afastam-se da margem ventro-posterior da concha, indicando um entroncamento ou alargamento da região dorsal e do músculo adutor posterior nessa direção, enquanto o ponto 8 afasta-se ou aproxima-se dos demais *landmarks*, indicando um alongamento ou encurtamento da linha palial. Já o Componente Principal 2 (PC2) explica 24,677% da variação, devido ao entroncamento ou alargamento da região posterior, do

músculo adutor posterior e do seio palial de acordo com a aproximação ou afastamento dos *landmarks* 4, 5, 6, 7 entre si e entre e a margem ventral posterior (Figura 8). Assim, o seio palial apresenta uma curva mais ou menos acentuada e a linha palial se comprime ou se alarga. Há uma relação antagônica entre a margem ventral posterior e a margem ventral anterior, enquanto uma encurta, voltando-se ao interior da concha, a outra alarga-se, voltando-se ao exterior, e vice-versa. Os demais PCs explicam 31,171% da variação (Apêndices A e B).

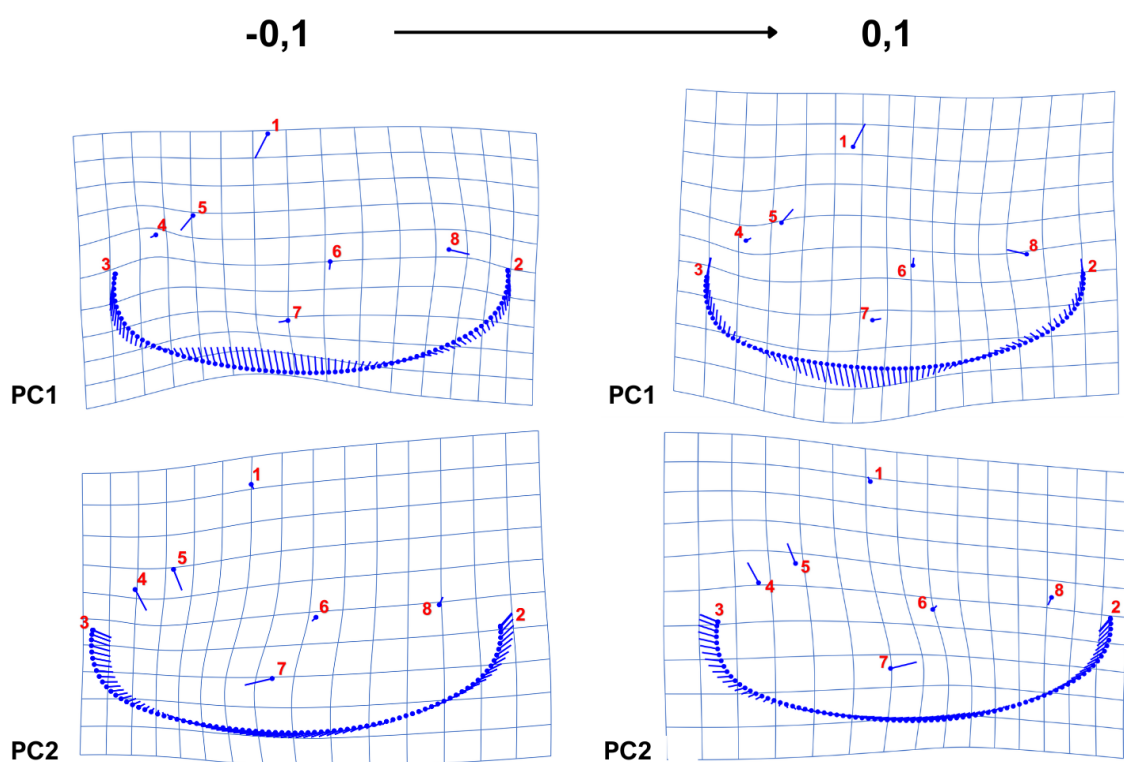


Figura 8. Gráficos *lollipop* (em azul escuro) sobrepostos às grades de transformação (em azul claro) para os extremos (-0.1 e 0.1) dos eixos da PCA, o Componente Principal 1 (PC1) e o Componente Principal 2 (PC2). Os *landmarks* estão especificados em números vermelhos. Os gráficos *lollipop* mostram as direções das forças aplicadas na deformação a partir dos pontos anatômicos, resultantes do deslocamento de cada ponto em relação aos demais, e as grades de transformação mostram as deformações resultantes em um plano cartesiano ficcional nos quais os pontos estariam distribuídos.

A CVA separou totalmente as populações de acordo com a localidade, sem sobreposição (Figura 9).

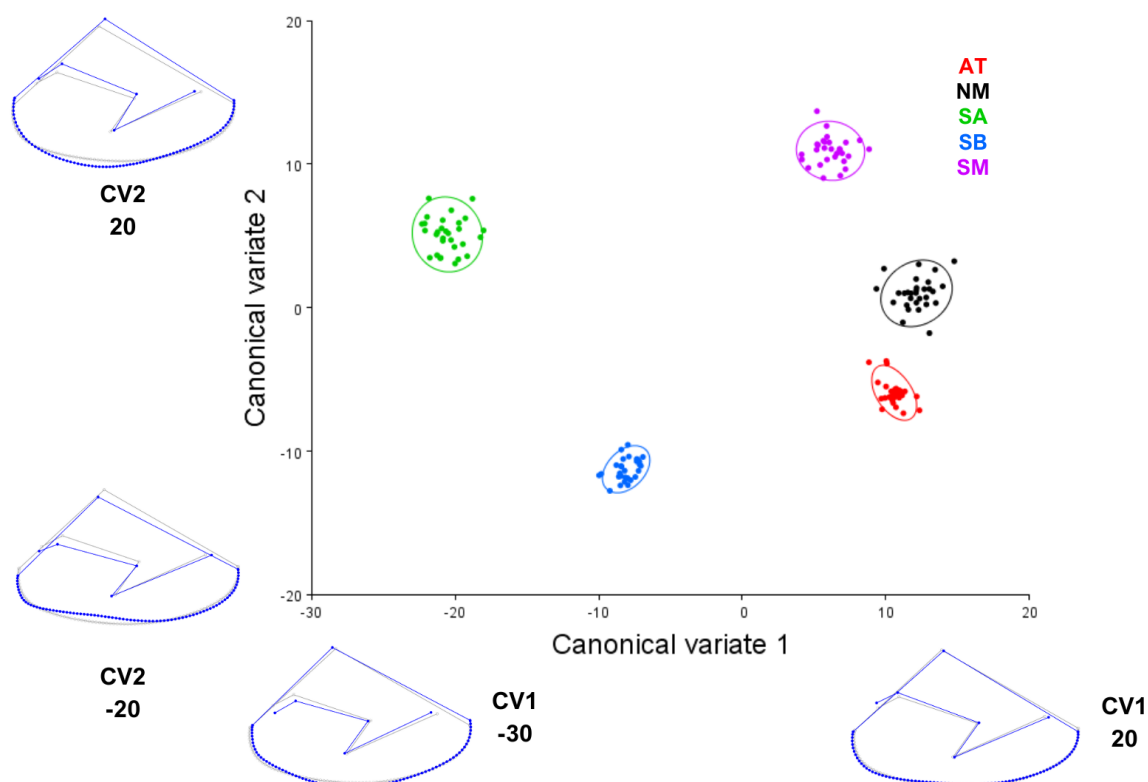


Figura 9. Gráfico da Análise das Variáveis Canônicas (CVA) entre as populações estudadas (AT = Atalaia; NM = Norte do Mosqueiro; SA = Santos; SB = São Sebastião; SM = Sul do Mosqueiro). O eixo x é representado pela Variável Canônica 1 (CV1) e o eixo y pela Variável Canônica 2 (CV2). As elipses de confiança indicam áreas nas quais 90% dos indivíduos de cada população estão localizados. Adjacentes ao gráfico encontram-se *wireframes* que representam as configurações de *landmarks* e *semilandmarks* nos extremos de cada eixo (em azul escuro) em relação à configuração média (em cinza).

A Variável Canônica 1 (CV1) é responsável por 61,864% da variação, devido ao afastamento ou aproximação entre os pontos 4, 5, 6 e 7 (ou seja, do músculo adutor posterior e do seio palial) entre si, à aproximação ou afastamento da margem ventral posterior em relação ao centro da concha, e pelo afastamento ou não da margem ventral mediana do centro, o que descreve uma margem mais convexa ou mais plana, respectivamente (Figura 10). Já a Variável Canônica 2 (CV2) separou bem os indivíduos de AT e NM e é responsável por 23,783% da variação, devido ao afastamento ou aproximação do umbo e do músculo adutor posterior em relação à margem ventral da concha e afastamento ou aproximação da margem ventral mediana do centro da concha, o que descreve uma margem ventral convexa ou

côncava, respectivamente (Figura 10). As demais CVs são responsáveis por 14,353% da variação.

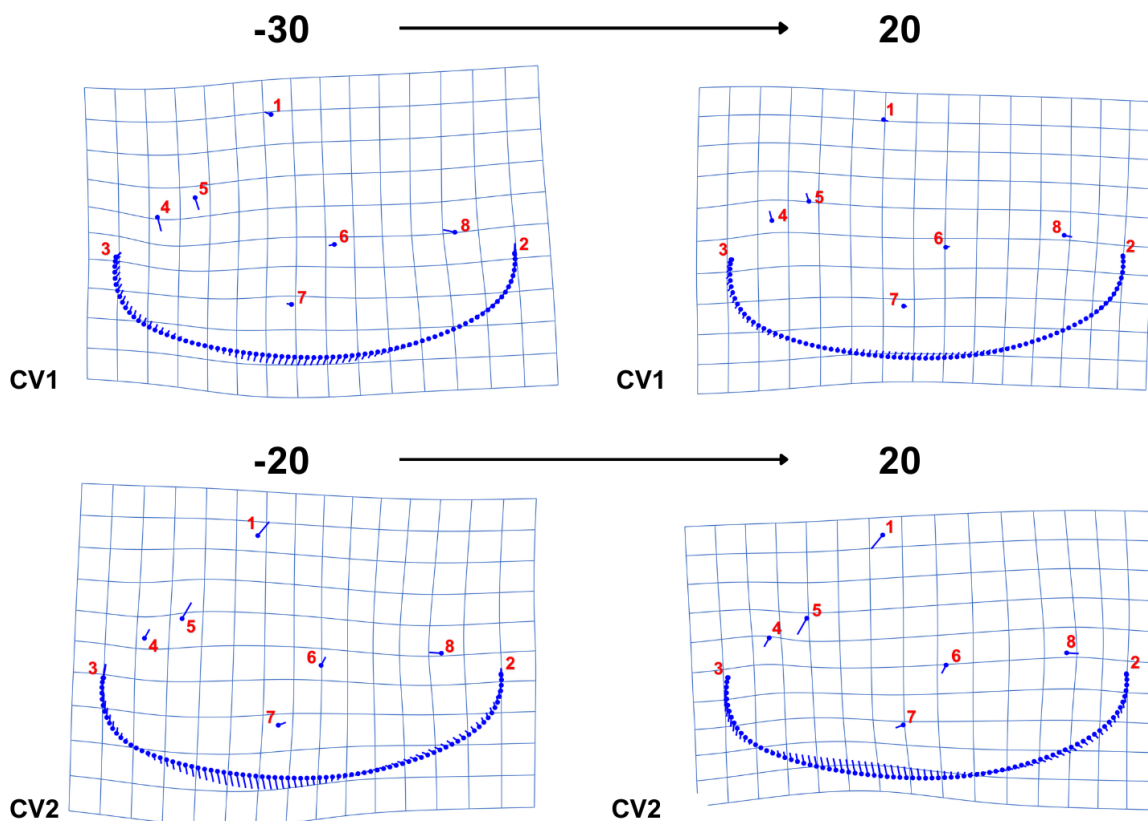


Figura 10. Gráficos *lollipop* (em azul escuro) sobrepostos às grades de transformação (em azul claro) para os extremos dos eixos da CVA, a Variável Canônica 1 (CV1) e a Variável Canônica 2 (CV2). Acima de cada extremo estão representados os fatores de escala para o eixo em questão (-30 e 30 para CV1 e -20 e 20 para CV2). Os *landmarks* estão especificados em números vermelhos. Os gráficos *lollipop* mostram as direções das forças aplicadas na deformação a partir dos pontos anatômicos, resultantes do deslocamento de cada ponto em relação aos demais, e as grades de transformação mostram as deformações resultantes em um plano cartesiano ficcional nos quais os pontos estariam distribuídos.

A CVA também fornece dados sobre as distâncias de Procrustes e de Mahalanobis entre os grupos, representadas na Tabela 2. Observa-se que todas as populações possuem diferenças significativas em relação às outras para as distâncias de Procrustes e Mahalanobis. A população do SM apresentou distâncias de Procrustes maiores em relação às demais populações sergipanas. As populações da AT e do NM apresentaram uma menor distância de Procrustes entre si que em relação às demais populações.

Tabela 2. Distâncias de Procrustes e de Mahalanobis entre as populações (AT = Atalaia; NM = Norte do Mosqueiro; SA = Santos; SB = São Sebastião; SM = Sul do Mosqueiro)

Populações	Procrustes	Valor-p Procrustes	Mahalanobis	Valor-p Mahalanobis
AT - NM	0,0303	<0,0001	16,9187	<0,0001
AT - SA	0,0497	<0,0001	33,5772	<0,0001
AT - SM	0,0469	<0,0001	13,6744	<0,0001
AT - SB	0,0510	<0,0001	25,7045	<0,0001
NM - SA	0,0641	<0,0001	29,2057	<0,0001
NM - SM	0,0665	<0,0001	20,3226	<0,0001
NM - SB	0,0713	<0,0001	26,5880	<0,0001
SA - SM	0,0412	<0,0001	33,4243	<0,0001
SA - SB	0,0350	<0,0001	22,8168	<0,0001
SM - SB	0,0206	<0,0001	22,6713	0,0042

A regressão linear entre as coordenadas de Procrustes e o tamanho de centroide indicou que a forma não é independente do tamanho (valor-p <0,0001) e que o tamanho explica cerca de 6,9% da variação na forma (Figura 11). As menores populações foram as do SM e de SB, agrupadas entre si e separadas totalmente das demais pelo tamanho. As populações da AT e do NM foram as maiores, sendo a de SA de um tamanho intermediário entre elas e as demais.

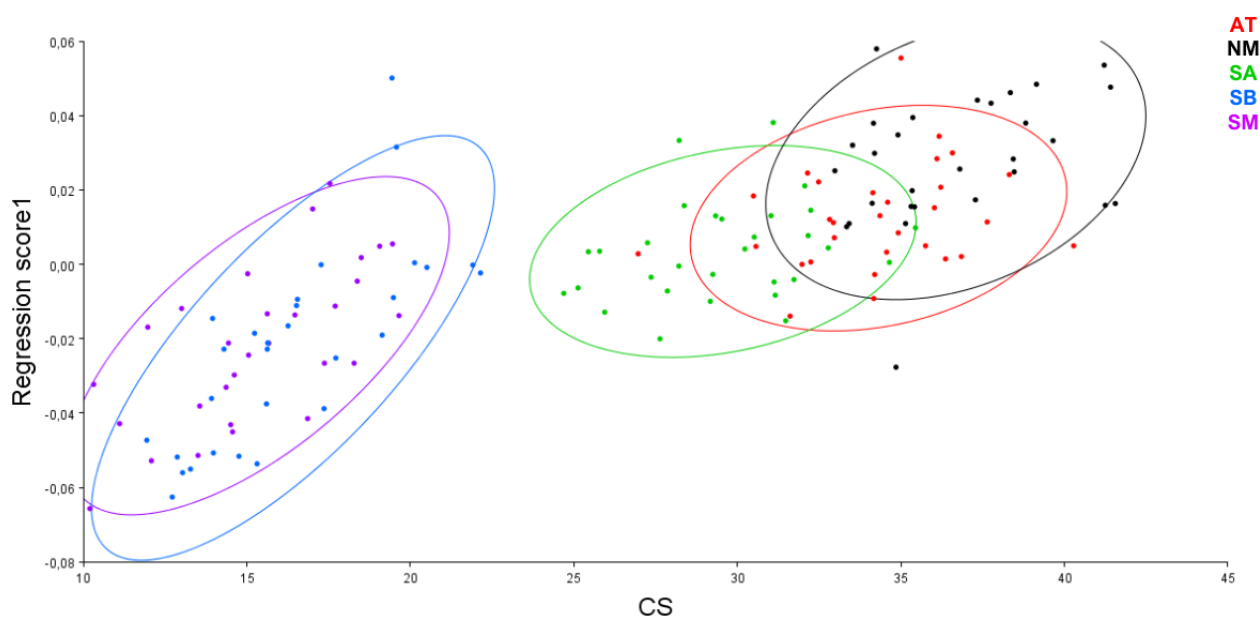


Figura 11. Regressão linear entre a forma, medida multivariada das coordenadas de Procrustes representada pelo *regression score* no eixo y, e tamanho, representado pelo tamanho de centroide (CS), entre as populações (AT = Atalaia; NM = Norte do Mosqueiro; SA = Santos; SB = São Sebastião; SM = Sul do Mosqueiro). As elipses de confiança indicam áreas nas quais 90% dos indivíduos de cada população estão localizados.

A ANOVA relatou que a localidade é um fator significativo para explicar ambos esses fatores (valor-p > 0,005 e 0,01, respectivamente) e explicou 2,849% da forma e 4,585% do tamanho das populações.

Tabela 3. Análise de Variância (ANOVA) da forma (coordenadas de Procrustes) e tamanho (tamanho de centroide) entre as populações. Df = graus de liberdade; SS = soma das distâncias quadradas; MS = Média das SS.

	Df	SS	MS	R ²	F	valor-p
Forma						
Localidade	1	0,099	0,099	0,028	4,252	>0,005
Resíduos	145	0,340	0,002	0,971		
Total	146	0,350				
Tamanho						
Localidade	1	3,4 x 10 ⁻⁶	3,4 x 10 ⁻⁶	0,046	6,967	>0,01
Resíduos	145	7,1 x 10 ⁻⁶	4,9 x 10 ⁻⁷	0,954		
Total	146	7,4 x 10⁻⁶				

A análise k-means sugeriu que um total de três grupos mórficos é o que melhor explica os dados (figura 12).

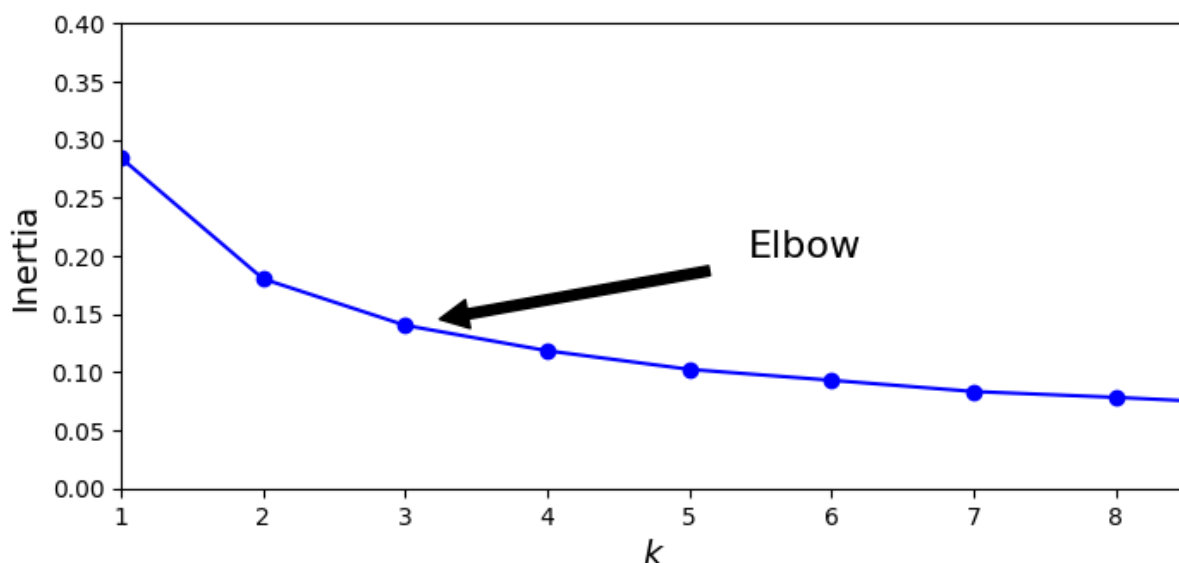


Figura 12. Análise k-means feita a partir dos primeiros cinco PCs da PCA. A inércia (*inertia*) indica mudanças na variação dos dados, e *k* indica o número de agrupamentos. A curva acentuada (*elbow* ou cotovelo) indica o *k* em que há uma súbita desaceleração da inércia, o que sugere o possível melhor número de agrupamento para os dados.

Géron (2019) relata que o uso do *elbow* como único determinante do melhor *k* pode ser impreciso, e sugere o uso do coeficiente de silhueta para uma análise mais precisa. Esse coeficiente varia de -1 (indivíduo mal alocado no grupo) a 1 (Indivíduo semelhante aos demais em seu grupo e diferente dos indivíduos dos demais grupos), sendo que um valor 0 indica um indivíduo na margem de um grupo. O valor de silhueta é computado a partir dos coeficientes de todos os indivíduos e indica quão bem os grupos estão separados, de -1 (muito mal) a 1 (muito bem) (Figura 13). A análise indicou que dois grupos (valor de silhueta ≈ 0.294) explicam melhor os dados que três (valor de silhueta ≈ 0.267) apesar de ambos os *k* apresentarem valores de silhueta relativamente baixos.

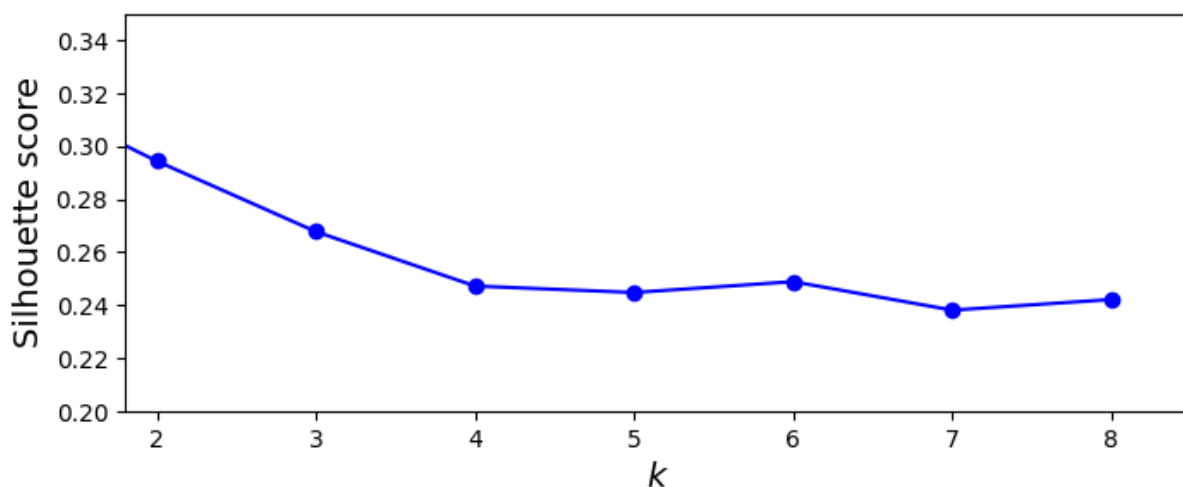


Figura 13. Análise do valor de silhueta (*silhouette score*) para diferentes números de agrupamentos (k) relativos aos primeiros cinco PCs da PCA.

Os resultados da análise do valor de silhueta podem ser melhor visualizados a partir de um diagrama de silhueta (Figura 14). Nesse diagrama, os coeficientes de silhueta de todos os indivíduos são organizados de acordo com os grupos em que eles foram designados, para diversos valores de k (GÉRON, 2019). O valor de silhueta do k é representado por uma linha vermelha. Para uma estimativa precisa, o ideal é que o k possua tanto um alto valor de silhueta quanto agrupamentos, cujos indivíduos possuem coeficientes iguais ou maiores que o valor de silhueta geral.

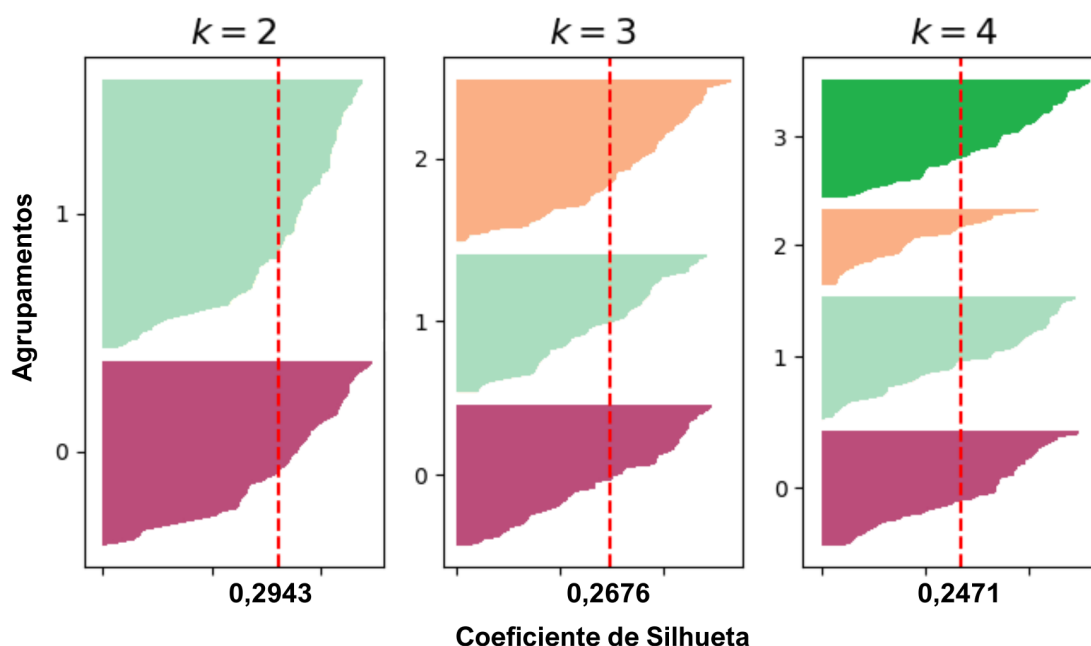


Figura 14. Diagrama de silhueta para números diferentes de agrupamentos (k). Indivíduos estão contidos nos grupos em que foram designados no k-means, em ordem decrescente de coeficiente de silhueta para cada grupo, de cima para baixo. A linha vermelha marca o valor de silhueta de cada k .

As populações originais foram comparadas com os agrupamentos gerados nas análises k-means para $k = 2$ e $k = 3$ (Tabela 4) e eles foram avaliados por meio da PCA (Figuras 15 e 16). Em ambos $k = 2$ e $k = 3$ toda a população do NM foi contida em um único agrupamento, no qual a maior parte da população da AT também estava contida. Em $k = 2$ a maior parte das populações de SA, SB e SM foram designadas ao mesmo agrupamento. Já em $k = 3$, a maior parte da população de SA foi designada ao agrupamento b, enquanto as de SB e SM foram designadas ao agrupamento a.

Tabela 4. Número de indivíduos de cada população designados aos agrupamentos gerados nas análises k-means para $k = 2$ e $k = 3$

Local de Coleta	k = 2 (a)	k = 2 (b)	k = 3 (a)	k = 3 (b)	k = 3 (c)
Praia da Atalaia	26	4	24	3	3
Norte do Mosqueiro	29	0	29	0	0
Sul do Mosqueiro	3	26	1	20	8
Santos	1	29	0	3	27
São Sebastião	1	28	0	21	8

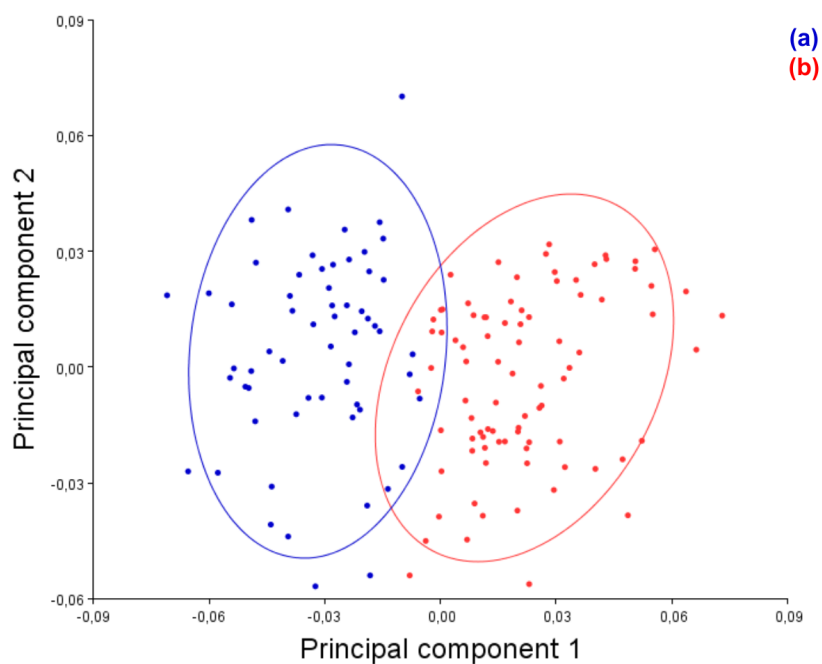


Figura 15. PCA com destaque aos grupos separados pelas análises K-means para $k = 2$. Grupo (a) destacado em azul e grupo (b) destacado em vermelho. As elipses de confiança indicam áreas nas quais 90% dos indivíduos de cada agrupamento estão localizados.

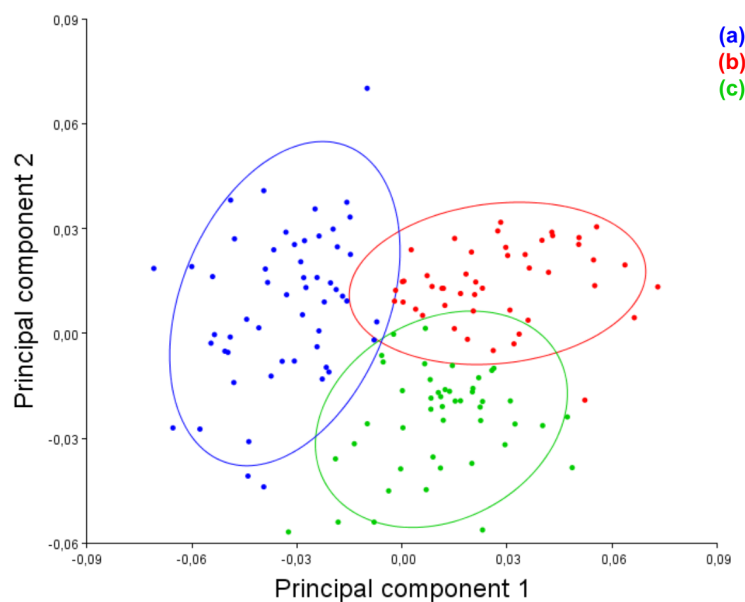


Figura 16. PCA com destaque aos grupos separados pelas análises k-means para $k = 3$. Grupo (a) destacado em azul, grupo (b) destacado em vermelho e grupo (c) destacado em verde. As elipses de confiança indicam áreas nas quais 90% dos indivíduos de cada agrupamento estão localizados.

4. DISCUSSÃO

A identificação de *D. gemmula* em mais um local do litoral nordestino reforça a hipótese de Barroso *et al.* (2013) de que sua distribuição seja contínua ao longo do litoral brasileiro.

As diferenças identificadas entre os indivíduos da AT e do NM em relação às demais populações na análise conchiliológica, bem como sua separação em um grupo distinto da maioria dos demais indivíduos nas análises k-means, tanto para $k = 2$ quanto para $k = 3$, indicam que eles possuem tipo mórfico distinto dos comumente associados ao *D. gemmula*. Além disso, esses indivíduos são consideravelmente menores que *D. striatus*, *D. hanleyanus* e *D. denticulatus*. Os indivíduos analisados possuem carena uniformemente arredondada e não quilhada. Essa característica os exclui de serem jovens de *D. striatus*, uma vez que os juvenis desta espécie apresentam a carena quilhada (BARROSO *et al.*, 2013). Não obstante, nenhum adulto de *D. striatus* (nem mesmo *D. vellicatus*) foi identificado entre as populações. Isso sugere que esses indivíduos não são juvenis das espécies de *Donax* já reportadas para o Brasil. Dessa forma, levantamos duas hipóteses: (i) é possível que os espécimes da AT e do NM pertençam à *D. vellicatus*, a qual pode apresentar uma ampla distribuição no Atlântico Ocidental, acompanhada por uma alta variação morfológica latitudinal, com tipos mórficos menores (e mais trapezoidais) e maiores (e mais cônicos) no Atlântico Sul; (ii) ou é possível que esses espécimes pertençam a uma espécie de *Donax* ainda não descrita pela ciência.

Embora a localidade tipo de *D. vellicatus* tenha sido designada *a posteriori* para o município de Areia Branca, RN por Morrison (1971), os espécimes estão depositados na Academia de Ciências Naturais de Drexel, Filadélfia, EUA, ao passo que os sítipos de *D. vellicatus* estão depositados no Museu de História Natural de Londres (NHM). Um estudo taxonômico aprofundado de *D. vellicatus*, juntamente com análises de espécimes provenientes do Caribe, será crucial para esclarecer a identificação dessa espécie no Brasil.

O uso de *semilandmarks* ao longo da margem ventral descreveu de forma mais detalhada e precisa a variação nessa curva. A variação do seio palial foi, em contraste, limitada à detecção de entroncamentos e alargamentos de forma geral, a

partir da relação entre os pontos 5, 6 e 7. Futuros trabalhos devem considerar o uso de *semilandmarks* para descrever variações da curva do seio palial de forma mais detalhada. Nenhum dos trabalhos consultados de morfometria geométrica com bivalves fez uso de *semilandmarks*, contudo, Signorelli & Printragoon (2022) utilizaram *outlines*, ou seja, o contorno da forma, de donacídeos para separar espécies da Tailândia em seu estudo com o uso misto de morfometria geométrica e análises moleculares. Os autores ressaltam que quando *landmarks* são difíceis de serem delimitados entre indivíduos, o uso de *outlines* é recomendado.

Os resultados indicam uma relação alométrica de tamanho e forma entre os espécimes estudados, porém outros fatores também estão envolvidos na variação da forma, visto que o tamanho explica somente 6,9% da variação. Uma alta alometria já foi observada em espécies de *Donax* com longos processos em regiões específicas das margens. Signorelli & Printragoon (2022) relataram uma covariação entre a forma da concha e o tamanho da espécie *Donax (Hecuba) scortum* L., 1758 da Tailândia, espécie que possui uma margem ventral posterior proeminente.

As populações do SM, SA e SB foram separadas totalmente pela CVA e apresentaram diferenças significativas em relação às suas distâncias de Procrustes e de Mahalanobis, apesar da PCA as agrupar e da análise conchiliológica as classificar como *Donax gemmula*. Esse resultado pode ter ocorrido, em parte, devido a uma característica da própria CVA, que assume as populações *a priori* (ZELDITH, 2004). Ocaña & Fernández (2011) demonstram espécies de *Donax* de diferentes praias cubanas apresentavam distintas relações alométricas de altura, largura e comprimento. Diferenças de tamanho, esculturas da concha e cor de *Donax* ocorrem entre populações, mesmo que não haja diferenças genéticas significativas (SIGNORELLI & PRINTRAGOON, 2020).

Além das diferenças entre populações, há diferenças entre os espécimes em cada população. Isso pode ser observado, por exemplo, pelos elipses de confiança da PCA, que mostram o quanto a maioria dos indivíduos de cada localidade variam em forma ao longo de dois PCs. Os espécimes também possuem diferenças de cor, alguns apresentaram coloração perolada nas faces interna e externa, outros possuíam cor branca com faixas púrpuras trirradiais, e outros possuíam face externa branca e face interna roxa. Essas diferenças podem ser explicadas pela plasticidade

fenotípica encontrada entre diversas espécies de diferentes táxons, que está associada a fatores abióticos, como a ação das ondas, velocidade da água, composição do substrato e profundidade, além de fatores bióticos e genéticos, como pressões seletivas ao longo da evolução (MARQUES, 2021). Smith (1975) relata que pressões seletivas podem ter um impacto na variação dos tipos mórficos (ex. concha totalmente branca, amarronzada, com ou sem listras radiais, etc) em espécies de *Donax* que migram com a maré: em altas densidades populacionais os tipos mórficos mais raros seriam os mais predados, já nas baixas densidades populacionais os predadores teriam preferência pelos tipos mórficos mais comuns na população, independente de quais sejam. Isso favoreceria a sobrevivência dos tipos mais raros, até o ponto em que eles se tornem os mais comuns e passem a ser mais predados que os demais, em uma seleção apostática.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os espécimes encontrados no sul do Mosqueiro foram identificados como *Donax gemmula*. A presença dessa espécie em mais uma localidade ao longo do litoral nordestino fortalece a hipótese de uma distribuição contínua ao longo da costa brasileira.

Entretanto, os espécimes do norte do Mosqueiro e da Atalaia apresentam notáveis diferenças em relação à descrição típica de *Donax gemmula*, sugerindo a possibilidade de se tratar de uma espécie nova. A morfometria geométrica mostrou-se uma ferramenta eficaz tanto para a identificação quanto para o estudo da forma de donacídeos, sendo que futuras pesquisas no gênero se beneficiarão do seu uso. O uso de *semilandmarks* ao longo da margem ventral é recomendado.

A coleta de novas amostras ao longo das praias do nordeste, combinada com a morfometria geométrica e análises de DNA genômico, poderá revelar resultados interessantes e preencher lacunas no conhecimento sobre os donacídeos. Outra abordagem útil seria a inclusão de dados relacionados a fatores abióticos nos locais de coleta, para investigar sua possível correlação com fatores morfométricos e genéticos.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, D. C.; Collyer M. L.; KALIONTZOPOULOU A & BAKEN, E. K. **Geomorph: Software for geometric morphometric analyses**. R package version 4.0.4. 2022.
- ANSELL, A. The biology of the genus *Donax*. In: A. McLachan & T. Erasmus (Eds). **Sandy beaches as Ecosystems**. Developments in Hydrobiology, v. 19, p. 607-635. 1983.
- ASTÚA, D. Morfometria geométrica e a revolução morfométrica - Localizando e visualizando mudanças na forma dos organismos. **Bioletim** - Revista de Divulgação Científica dos Estudantes de Biologia v. 3, n. 3. 2003.
- BAKEN, E. K., COLLYER M. L.; KALIONTZOPOULOU A. & ADAMS D. C. Geomorph v4.0 and gmShiny: enhanced analytics and a new graphical interface for a comprehensive morphometric experience. **Methods in Ecology and Evolution**. Methods in Ecology and Evolution. v12 p. 2355-2363. 2021.
- BARROSO, C.; RABAY, S. & PASSOS, F. & MATTHEWS-CASCON, H. An extended geographical distribution of *Donax gemmula* Morrison, 1971 (Bivalvia: Donacidae): New record from the Brazilian Northeastern coast. **Check List**, v. 9, n. 5, p. 1087-1090. 2013.
- BIELER, R.; MIKKELSEN, P. & GIRIBET, G. Bivalvia - a discussion of know unknowns. **American Malacological Bulletin**, v. 31, n. 1 p. 123-133. 2013.
- BIELER R. *et al.* Investigating the Bivalve Tree of Life – an exemplar-based approach combining molecular and novel morphological characters. **Invertebrate Systematics** v. 28, p. 32-115. 2014.
- BOOKSTEIN, F. L. **Morphometric Tools for Landmark Data Geometric and Biology**. Cambridge University, Cambridge. University Press. 1991.
- DAPAR, M. & TABUGO, S. Describing shell shapes of *Venerid bivalves* using elliptic fourier analysis. **International Journal of Biosciences**, v. 12, n.1, p. 82-89. 2018.
- GÉRON, A. **Hands-on Machine Learning with Scikit-Learn, Keras & TensorFlow: Concepts, Tools and Techniques to Build Intelligent Systems**. 2ª ed. O'Reilly. 2019.
- GONZÁLEZ, V. *et al.* A phylogenetic backbone for Bivalvia: an RNA-seq approach. **Proceedings of the Royal Society B**. v. 282. 2015.
- KLINGENBERG, C. P. 2011. MorphoJ: an integrated software package for geometric morphometrics. **Molecular Ecology Resources**. v. 11. p. 353-357.
- MARINHO, T. & ARRUDA, E. Shell-specific differentiation: how geometric morphometrics can add to knowledge of Macominae species (Tellinidae, Bivalvia). **Marine Biodiversity**, v. 51, n. 40. 2021.

MARQUES, R. **Diferenciação morfométrica da concha de *Anodontites trapesialis* (Lamark, 1819) (Mollusca, Bivalvia) em diferentes bacias hidrográficas brasileiras.** TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba. São Paulo. 2021.

MARQUES, R.; SILVA, A. & SIMONE, L. Cladistic analysis of the transisthmian genus *Eurytellina* (Bivalvia: Tellinoidea) based on morphological and morphometric data. **Organisms Diversity & Evolution**, v. 22, p. 857-891. 2022.

MONCADA, E. *et al.* Marine surf to freshwater: a molecular phylogeny of Donacidae (Bivalvia: Heterodonta). **Invertebrate Systematics**, v. 36, n. 11, p. 984-1001. 2022.

MORRISON, J. West Atlantic *Donax*. **Proceedings of the Biological Society of Washington**, v. 83, n. 48, pp. 545-568, 1971.

NEVES, F. & BEMVENUTI, C. Variabilidade diária da zonação da macrofauna bentônica em praias arenosas do litoral norte do Rio Grande do Sul. **Iheringia, Série Zoológica**, v. 99, n. 1, p. 71-81. 2009.

NEWELL, N. Classification of the Bivalvia. **American Museum Novitates**, n. 2206. 1965.

OCAÑA, F. & FERNÁNDEZ, A. Shell morphometry of *Donax striatus* and *Donax denticulatus* from two beaches in eastern Cuba. **Journal of Marine and Coastal Sciences**, v. 3, p. 67-75. 2011.

PASSOS, F. & DOMANESCHI, O. Biologia e anatomia funcional de *Donax gemmula* Morrison (Bivalvia, Donacidae) do litoral de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Zoologia**, v. 21, n. 4., p. 1017-1032. 2004.

PRINTRAKOON, C.; UNAJAK, S. & SIGNORELLI, J. Identification and Distribution of Wedge Clams (Donacidae: Bivalvia) in Thailand by Geometric Morphometric and Molecular Analysis. **Zoological Studies** v. 61, n. 82. 2022.

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing.** R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2022.

REEVE, L. A. **Monograph of the genus *Donax*.** In: *Conchologia Iconica, or, illustrations of the shells of molluscos animals*, v. 8, pl. 9. L. Reeve & Co., London. 1855.

RIOS, E. **Compendium of Brazilian sea shells.** Rio Grande, RS : Evengraf. 2009.

ROHLF, F. J.; ADAMS, D. C.; SLICE, D. E. Geometric Morphometrics: ten years of progress following the “revolution”. **Ital J Zool** v. 71. p. 5-16. 2004.

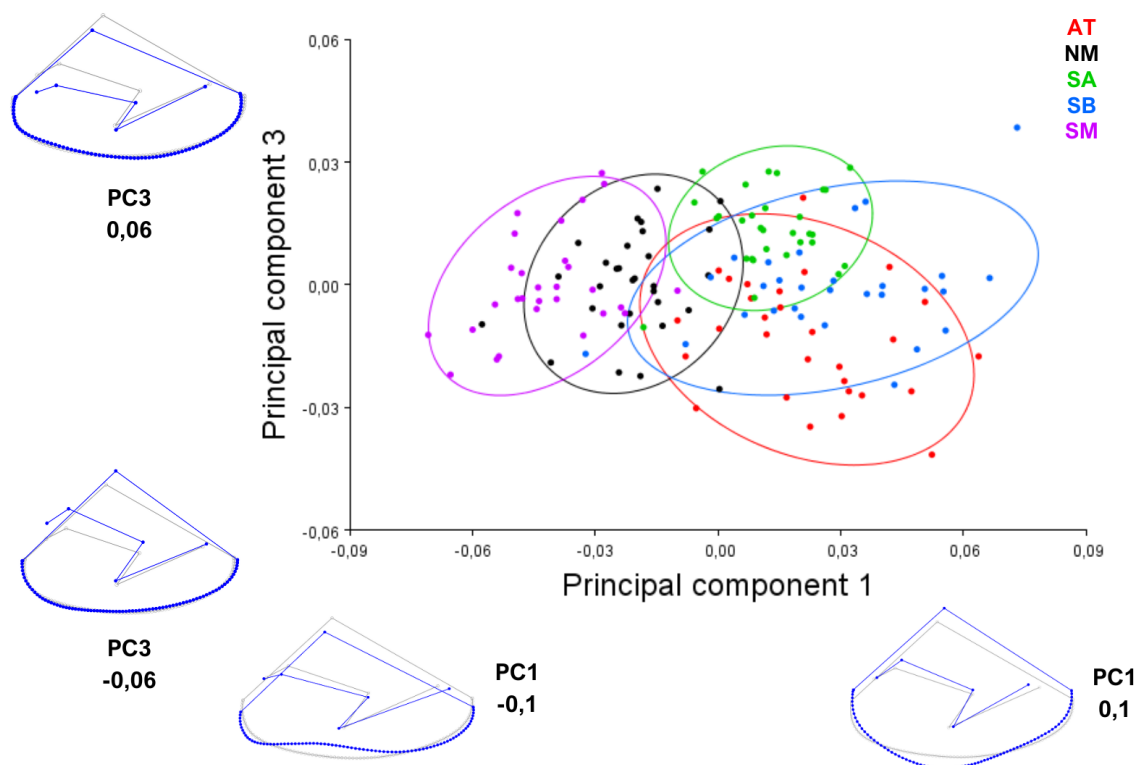
SIGNORELLI J. & PRINTRAKOON, C. The family Donacidae (Bivalvia: Tellinoidea) in Thai waters. **Molluscan Research**, v. 40, n. 1, p. 8-35. 2020.

SMITH, D. Polymorphism and selective predation in *Donax faba* Gmelin (Bivalvia: Telinacea). **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, v. 17, n. 2, p. 205-219. 1975.

SOWERBY, G. B. **Thesaurus conchyliorum, or, Monographs of genera of shells**. V. 3, p. 313. Smithsonian Libraries and Archives. 1855.

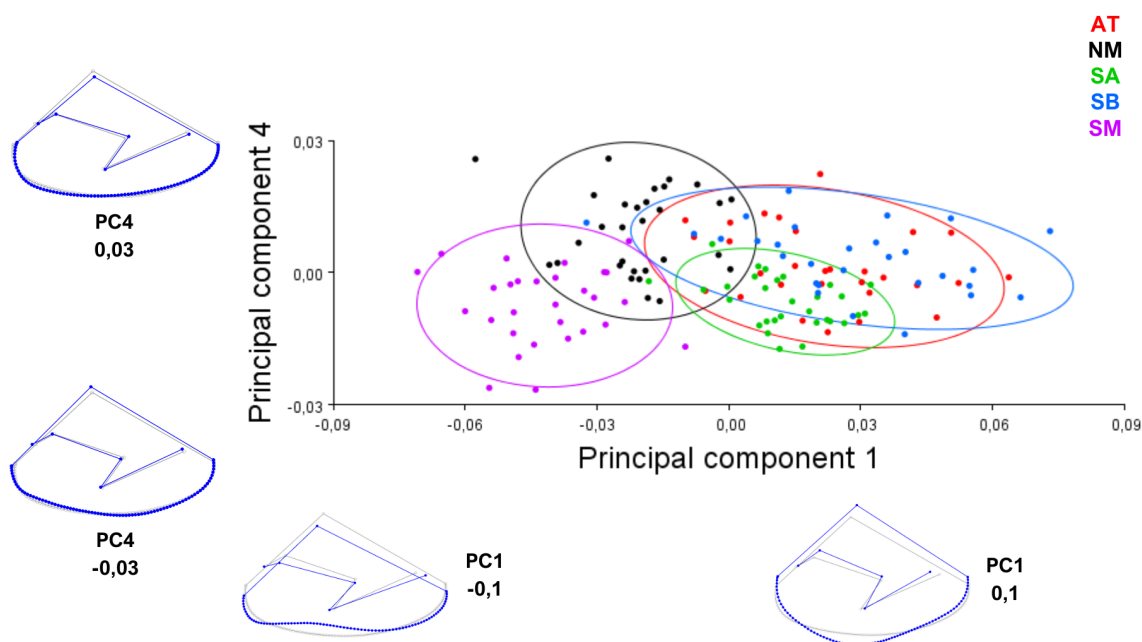
ZELDITH, M. *et al.* **Geometric Morphometrics for Biologists: A Primer**. Elsevier. 2004.

APÊNDICE A - ANÁLISE DOS COMPONENTES PRINCIPAIS ENTRE PC1 E PC3



Apêndice A. Gráfico da Análise dos Componentes Principais (PCA) entre as populações estudadas (AT = Atalaia; NM = Norte do Mosqueiro; SA = Santos; SB = São Sebastião; SM = Sul do Mosqueiro). O eixo x é representado pelo Componente Principal 1 (PC1) e o eixo y pelo Componente Principal 3 (PC3). As elipses de confiança indicam áreas nas quais 90% dos indivíduos de cada população estão localizados. Adjacentes ao gráfico encontram-se *wireframes* que representam as configurações de *landmarks* e *semilandmarks* nos extremos de cada eixo (em azul escuro) em relação à configuração média (em cinza). PC3 explica 9,892% da variação.

APÊNDICE B - ANÁLISE DOS COMPONENTES PRINCIPAIS ENTRE PC1 E PC4



Apêndice B. Gráfico da Análise dos Componentes Principais (PCA) entre as populações estudadas (AT = Atalaia; NM = Norte do Mosqueiro; SA = Santos; SB = São Sebastião; SM = Sul do Mosqueiro). O eixo x é representado pelo Componente Principal 1 (PC1) e o eixo y pelo Componente Principal 4 (PC4). As elipses de confiança indicam áreas nas quais 90% dos indivíduos de cada população estão localizados. Adjacentes ao gráfico encontram-se *wireframes* que representam as configurações de *landmarks* e *semilandmarks* nos extremos de cada eixo (em azul escuro) em relação à configuração média (em cinza). PC4 explica 4,656% da variação.