

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
Programa de Pós-Graduação em Diversidade Biológica e Conservação
nos Trópicos**

GABRIELA MIKI KUWAI

**TARTARUGAS-VERDES (*Chelonia mydas*) COMO ESPÉCIE SENTINELA: A
RELAÇÃO DA DEGRADAÇÃO COSTEIRA COM A FIBROPAPILOMATOSE**

**MACEIÓ - ALAGOAS
Março / 2021**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
Programa de Pós-Graduação em Diversidade Biológica e Conservação
nos Trópicos**

GABRIELA MIKI KUWAI

**TARTARUGAS-VERDES (*Chelonia mydas*) COMO ESPÉCIE SENTINELA: A
RELAÇÃO DA DEGRADAÇÃO COSTEIRA COM A FIBROPAPILOMATOSE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Diversidade Biológica e Conservação nos Trópicos do Instituto de Ciências Biológicas e da Saúde, Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do grau de mestre em CIÊNCIAS BIOLÓGICAS na área da Biodiversidade.

Orientador: Prof^o Dr^o Robson Guimarães dos Santos

Coorientador: Dr^o João Vitor Campos Silva

**MACEIÓ - ALAGOAS
Março / 2021**

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 - 1767

K97t Kuwai, Gabriela Miki.

Tartarugas-verdes (*Chelonia mydas*) como espécie sentinela : a relação da degradação costeira com a fibropapilomatose / Gabriela Miki Kuwai. – 2021.
50 f. : il.

Orientador: Robson Guimarães dos Santos.

Co-orientador: João Vítor Campos Silva.

Dissertação (mestrado em Ciências Biológicas) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Biológicas e da Saúde. Programa de Pós-Graduação em Diversidade Biológica e Conservação nos Trópicos. Maceió, 2021.

Inclui bibliografias.

1. Biodegradação ambiental. 2. Urbanização. 3. Homem - Efeito do meio ambiente. 4. Tartarugas. 5. Biomarcadores ambientais. 6. Neoplasias. I. Título.

CDU: 598.133

Agradecimentos

A minha família que me apoiou e compreendeu meus momentos de ausência durante esse período. Em especial à minha mãe, meu irmão, minha cunhada, tia Rose, meu avô e meu sobrinho Yuan que com sua doçura, trazia alegria mesmo os meus dias mais tensos.

Ao meu companheiro de vida, Cauay Vianna. Sem seu suporte dado das mais diversas formas com certeza seria um caminho muito mais difícil. Obrigada por tudo!

A todos meus amigos da Uncisal que de alguma forma me ajudou passar por momentos turbulentos de conciliação entre trabalho e estudos. O apoio de vocês foi essencial!

Aos meus amigos de laboratório (Lamarc) e da turma do mestrado 2019 DIBICT por todas as conversas, desabafos e risadas. Como sinto falta dos nossos encontros ocasionais cheios de descontração.

Ao meu orientador, Prof^o Robson Santos, e coorientador, João Silva, por todo apoio, paciência e dedicação na minha formação como cientista. Trabalhar com vocês me permitiu novas possibilidades e sou muito grata por isso.

Aos avaliadores dos projetos, das apresentações e da banca de qualificação e defesa que estiveram dispostos a contribuir com meu trabalho e formação acadêmica sempre com muita competência, respeito e gentileza.

A todos divulgadores científicos, pesquisadores e professores que me fizeram gostar de ciência!

Ao IBAMA e Instituto Biota de Conservação pela disponibilização dos dados.

Ao DIBICT pela oportunidade.

À Universidade Federal de Alagoas, uma instituição pública, gratuita e de qualidade que me possibilitou enxergar o mundo com criticidade e oportunizou diversas experiências nas quais eu não teria fora da universidade.

A todos foram e estão sendo muito importante na minha formação como acadêmica e como pessoa.

Muito obrigada!

Sumário

1. Apresentação	11
2. Revisão da Literatura.....	12
2.1. A ocupação costeira e seus impactos.....	12
2.3. Tartarugas-verdes – ciclo de vida, impactos antrópicos e estado de conservação.....	13
2.4. Fibropapilomatose: histórico e etiologia	15
3. TARTARUGAS-VERDES (<i>Chelonia mydas</i>) COMO ESPÉCIE SENTINELA: A RELAÇÃO DA DEGRADAÇÃO COSTEIRA COM A FIBROPAPILOMATOSE.....	22
3.1. Introdução:.....	23
3.2. Materiais e Métodos:.....	25
3.2.1. Prevalência e severidade de FP	28
3.2.2. Fatores que influenciam FP	28
3.2.2.1. <i>Night light</i> (NL).....	28
3.2.2.2. Saneamento básico (SB).....	29
3.2.2.3. Distância da desembocadura de rios	29
3.2.2.4. Fases da vida da tartaruga	29
3.2.3. Evolução temporal e variação geográfica da FP.....	30
3.2.4. Análises estatísticas.....	30
4.3.1. Prevalência de FP	31
4.3.2. Sobre a severidade de FP.....	35
4.4. Discussão.....	37
4.5. Conclusão	41
4.6. Referencial bibliográfico	41

Lista de Figuras

- Figura 1.** Fluxograma dos critérios utilizados para seleção dos dados de *Chelonia mydas*, as áreas e os anos avaliados. Cada título do quadro vermelho informa em qual análise esses dados foram utilizados, sendo FP: fibropapilomatose e CCC: comprimento curvilíneo da carapaça..... 27
- Figura 2.** Prevalência de fibropapilomatose em *Chelonia mydas* encalhadas no Brasil por ano nas regiões do Nordeste – Setor 1 (Nord1, linha verde), Nordeste – Setor 2 (Nord2, linha azul) e Sudeste (Sud, linha amarela) e a média e desvio padrão do país (BR, linha preta) ao longo do tempo. Valores dos testes de correlação de *Pearson* estão ao lado das linhas do gráfico. 32
- Figura 3.** Prevalência da fibropapilomatose em *Chelonia mydas* com avaliações bianuais, nas três regiões do Brasil, com os dados de *night light* indicando urbanização referente a cada ano..... **Erro! Indicador não definido.**33
- Figura 4.** Gráficos resultantes do modelo aditivo generalizado, mostrando os efeitos de NL = *night light* representando urbanização, SB = saneamento básico e CCC = comprimento curvilíneo da carapaça sobre a prevalência de FP de *Chelonia mydas*, conforme o modelo $FP \sim NL + SB + CCC$ para o Nordeste – Setor 1 e Sudeste. Em Nordeste – Setor 2, houve colinearidade entre NL e SB, portanto, o modelo foi $FP \sim NL + CCC$. Foram considerados dados gerais (Brasil) e divididos por regiões (Nordeste – Setor 1 e 2 e Sudeste) 34
- Figura 5.** Prevalência de fibropapilomatose em *Chelonia mydas* por classe de tamanho das tartarugas-verdes encontradas encalhadas na costa do Brasil dividido por regiões monitoradas, de 2010 a 2016. 35
- Figura 6.** Mapa com médias de índice de severidade da fibropapilomatose de *Chelonia mydas*, com rios e *night light* em Alagoas - Brasil, referente aos dados de 2018 36
- Figura 7.** Resultado do modelo de regressão linear do índice de severidade da fibropapilomatose de *Chelonia mydas* em Alagoas em relação ao CCC = comprimento curvilíneo da carapaça, NL = *night light* e Dist. rio = distância de

rio, usando o seguinte modelo: $FPI \sim CCC + NL + \text{dist\~{a}ncia de rio}$ que apresentou $r^2 = 0.0571$ 37

Figura S1. Valores de coeficiente de correla~{c}o~{e} entre as vari\~{a}veis explicativas: CCC = comprimento curvil\~{i}neo da carapa~{c}a de *Chelonia mydas*, SB = saneamento b\~{a}sico, NL = *night light*, considerando dados completos (Brasil) e divididos por regi\~{o}es (Nordeste – Setor 1 e 2 e Sudeste). N\~{i}veis de signific\~{a}ncia est\~{a}o representados pelos asteriscos, sendo $p < 0.001$ ‘***’; $p < 0.01$ ‘**’ ; $p < 0.05$ ‘*’48

Figura S2. Valores de coeficiente de correla~{c}o~{e} entre as vari\~{a}veis explicativas que podem influenciar a severidade de fibropapilomatose em *Chelonia mydas*, sendo CCC = comprimento curvil\~{i}neo da carapa~{c}a, SB = saneamento b\~{a}sico, NL = *night light*. N\~{i}veis de signific\~{a}ncia est\~{a}o representados pelos asteriscos, sendo $p < 0.001$ ‘***’; $p < 0.01$ ‘**’ ; $p < 0.05$ ‘*’ 48

Figura S3. Preval\~{e}ncia da fibropapilomatose em *Chelonia mydas* com avalia~{c}o~{e}s anuais, nas tr\~{e}s regi\~{o}es do Brasil avaliadas, com os dados de *night light* indicando urbaniza~{c}o~{e} referente a cada ano.. 49

Lista de Tabelas

Tabela S1. Lista das localidades que tiveram monitoramento de *Chelonia mydas* (CM) e a avaliação quanto à fibropapilomatose. Alagoas (AL) teve monitoramento em período e localidades diferentes resultando em AL1 contida em Nord2 e AL2 47

Tabela S2. Teste t de *Student* entre as variáveis explicativas CCC = comprimento curvilíneo da carapaça de *Chelonia mydas* encontradas encahadas, SB = saneamento básico, NL = *night light* por região estudada. Sendo Nordeste – setor 1 abrangendo os estados do Ceará (CE) e Rio Grande do Norte (RN); Nordeste – setor 2 com Alagoas (AL1: 2010-2016), Sergipe (SE) e Bahia (BA); e do Sudeste: Espírito Santo (ES) e Rio de Janeiro (RJ). 47

Tabela S3. Valores de prevalência (prev) de fibropapilomatose e total de indivíduos (n) de *Chelonia mydas* avaliados por estado, região e ano. Sendo: Nordeste – setor 1 (Nord1) abrangendo os estados do Ceará (CE) e Rio Grande do Norte (RN); Nordeste – setor 2 (Nord2) com Alagoas (AL1), Sergipe (SE) e Bahia (BA); do Sudeste: Espírito Santo (ES) e Rio de Janeiro (RJ). 50

Lista de abreviaturas e símbolos

AL – Alagoas

BA – Bahia

BR – Brasil

CCC – Comprimento Curvilíneo da Carapaça

CE – Ceará

ChHV5 – *Chelonid alphaherpesvirus 5*

ES – Espírito Santo

FP – Fibropapilomatose

NL – *Night Light*

Nord1 – Nordeste Setor1

Nord2 – Nordeste Setor2

RJ – Rio de Janeiro

RN – Rio Grande do Norte

SB – Saneamento Básico

SE – Sergipe

Sud – Sudeste

Resumo

O uso de espécies sentinelas como as tartarugas-verdes (*Chelonia mydas*) pode ser uma maneira eficaz de monitorar ambientes degradados, considerando que o ecossistema marinho tem passado por grandes reestruturações e há iminente colapso dos serviços ecossistêmicos. A espécie é acometida pela fibropapilomatose (FP), doença debilitante caracterizada por tumores, com causa multifatorial, associada à presença de um herpesvirus e fortemente relacionada à degradação ambiental, apesar de não estar claro quais fatores e como essa relação ocorre. O presente trabalho analisou a variação espacial e temporal da FP em tartarugas-verdes no Atlântico Sudoeste através de criação de mapas de calor, além de testar a influência da urbanização - medida por *night light* (NL), saneamento básico (SB) e distância de rios - e a fase de vida das tartarugas baseada no comprimento curvilíneo da carapaça (CCC) com a prevalência e/ou severidade de FP por meio de modelos aditivos generalizados. Foram utilizadas informações advindas dos Projetos de Monitoramento de Praias de cerca de 13mil indivíduos enclachados ao longo de um gradiente latitudinal. Os resultados mostram que a prevalência da FP tem aumentado ao longo do tempo na maioria das regiões avaliadas, sugerindo possível intensificação da degradação costeira nas regiões. NL, SB e CCC parecem ser importantes na prevalência de FP, porém, outros fatores locais devem estar associados à manifestação da doença. O monitoramento de FP em tartarugas-verdes é importante não apenas para avaliar a pressão das atividades humanas na espécie, considerada ameaçada de extinção, mas também para acompanhar a qualidade de todo o ecossistema em que a tartaruga está inserida.

Palavras-chave: Degradação ambiental, urbanização, impacto antrópico, tartarugas marinhas, bioindicador, tumor.

Abstract

The use of sentinel species such as green turtles (*Chelonia mydas*) can be an effective way to monitor degraded environments, considering that the marine ecosystem has undergone major restructuring and there is an imminent collapse of ecosystem services. The species is affected by fibropapillomatosis (FP), a debilitating disease characterized by tumors, with a multifactorial cause, associated with the presence of a herpes virus and strongly related to environmental degradation, although it is not clear what factors and how this relationship occurs. The present work analyzed the spatial and temporal variation of FP in green turtles in the Southwest Atlantic through the creation of heat maps, in addition to testing the influence of urbanization - measured by night light (NL), basic sanitation (BS) and distance from rivers - and the life stage of the turtles based on the carapace curvilinear length (CCL) with the prevalence and/or severity of FP through generalized additive models. Advanced information from the Beach Monitoring Projects of around 13,000 was used, which are stranded along a latitudinal gradient. The results show that the prevalence of FP has increased over time in most of the evaluated regions, suggesting a possible intensification of coastal degradation in the regions. NL, SB and CCL seem to be important in the prevalence of FP, however, other local factors must be associated with the manifestation of the disease. The monitoring of FP in green turtles is important not only to assess the pressure of human activities on the species, considered to be threatened with extinction, but also to monitor the quality of the entire ecosystem in which the turtle is inserted.

Keywords: Environmental degradation, urbanization, anthropic impact, marine turtle, bioindicator, tumor.

1. Apresentação

Monitorar a qualidade dos ecossistemas marinhos que estão sob constante e intensa pressão antrópica é de grande importância para que possamos identificar os principais impactos e traçar estratégias de conservação e recuperação destes ambientes. O uso de espécies sentinelas como as tartarugas-verdes (*Chelonia mydas*) que podem informar a qualidade de seu habitat a partir de dados da sua saúde, como manifestação da fibropapilomatose (FP), é uma ferramenta importante na tentativa de compreensão do estado atual de ecossistemas marinhos.

Esta dissertação está dividida em referencial teórico e um capítulo em formato de artigo científico. No referencial teórico é apresentado o contexto atual da degradação do ecossistema marinho, características biológicas da tartaruga-verde e uma breve revisão sobre a FP.

Já no capítulo em formato de artigo científico, buscou-se avaliar a relação entre variáveis ambientais e a manifestação da FP. Além disso, foram feitas avaliações temporais e geográficas da prevalência da doença no Brasil. Com o intuito de fornecer informações que tenham utilidades para tomadores de decisão, também foi disponibilizado dados detalhados sobre a doença no material suplementar.

2. Revisão da Literatura

2.1. A ocupação costeira e seus impactos

Áreas próximas a corpos d'água como rios e mares são locais ideais para assentamento de populações humanas (KONISHI, 2000), devido aos diversos serviços ecossistêmicos prestados por estes ambientes (GRIZZETTI, 2016). Conseqüentemente, seus impactos são registrados desde a época romana (2500 anos a.C.) e a degradação tem acelerado nos últimos 150 a 300 anos (LOTZE et al., 2006). A zona costeira, além dos recursos alimentares, dispõe de recursos geológicos essenciais para a sociedade (como petróleo e gás) e facilita o transporte de pessoas e mercadorias, consolidando o comércio inter-regional e favorecendo a ocupação do seu entorno (KONISHI, 2000; DE SHERBININ et al., 2007; BLACKBURN et al., 2019). Desta forma, as regiões costeiras (cerca de 100 km da linha de costa) apresentam as maiores densidades populacionais (SMALL; NICHOLLS, 2003; MCGRANAHAN et al., 2007; BLACKBURN et al., 2019), e as estimativas futuras são de aumento populacional e da urbanização nessas regiões (DE SHERBININ et al., 2007; BLOOM, 2011). Esse aumento da pressão antrópica aproxima a previsão de colapso dos ecossistemas marinhos e conseqüentemente de interrupção de diversos serviços ecossistêmicos nas próximas décadas (SMALE et al., 2019) devido às alterações ambientais que geram, por exemplo, desestabilização da linha da costa e erosão (BARBIE et al., 2017), e às extinções de várias espécies com papéis ecológicos únicos nesse ambiente (PIMIENTO et al., 2020).

Esse nível de degradação é resultante de uma pressão histórica, contínua e crescente exercida nos ambientes costeiros, explorados e impactados pelas atividades humanas (LOTZE et al., 2006; HALPERN et al., 2008; HALPERN et al., 2015). Toda essa pressão faz com que a região costeira seja a mais degradada, e por maior período de tempo, quando comparada a outros ambientes marinhos (LOTZE et al., 2006, BREITBURG et al., 2018). O resultado disso é a degradação ou perda de 35% de manguezais, 29% das ervas marinhas (BARBIE et al., 2017) e cerca de 95% dos recifes de coral que passaram um ou mais episódios de branqueamento de coral severo (HUGHES et al., 2018), além do rápido crescimento de zonas mortas (baixa concentração de oxigênio) a ponto de afetar a resiliência dos ecossistemas costeiros (BREITBURG et al., 2018).

Essas são apenas algumas das ameaças que tornam urgente o monitoramento da saúde dos ecossistemas marinhos.

2.2. Espécies sentinelas

Uma das maneiras de fazer o monitoramento dos ecossistemas marinhos é avaliar espécies consideradas bioindicadoras ambientais. Tais espécies são sensíveis às mudanças em seu habitat, acumulando estressores que podem refletir na sua saúde e dar informações sobre a qualidade do ambiente (FRÄNZLE, 2003; BONANNO; ORLANDO-BONACA, 2018). Dentre as bioindicadoras, as espécies sentinelas são aquelas que alertam sobre a qualidade do ecossistema antes do seu comprometimento funcional, sinalizando impacto negativo na saúde de indivíduos ou de populações (BOSSART, 2011). Essas informações podem ser úteis para orientar os formuladores de políticas e gestores ambientais para auxiliar em manejos e projetos de conservação de espécies (BOSSART, 2011; BONANNO; VYMAZAL, 2017).

O uso de bioindicadores como sentinelas ambientais para obter informações sobre impactos de poluentes é comum e são várias as espécies usadas com esse objetivo, como os corais (FABRICIUS, et al. 2012), as macroalgas (ORFANIDIS et al., 2001), os moluscos (DIRRIGL, et al 2018), e diversas espécies de vertebrados (BOSSART; 2011; FOSSI; PANTI, 2017). Uma delas é a tartaruga-verde, também considerada uma ótima sentinela ambiental devida às suas particularidades (AGUIRRE; LUTZ, 2004). Características como ser de vida longa e ter uma razoável fidelidade às suas áreas de alimentação próximas à região costeira, pode oferecer informações essenciais sobre seus habitats (AGUIRRE; LUTZ, 2004), como outros estudos já observaram (AL-BAHRY et al., 2011, SANTOS, et al. 2011).

2.3. Tartarugas-verdes – ciclo de vida, impactos antrópicos e estado de conservação

As tartarugas-verdes (*Chelonia mydas*) são animais de crescimento lento e vida longa e apresentam um complexo padrão de história de vida, com uma série de mudanças de hábito de acordo com sua ontogenia (LUTZ; MUSICK; WYNEKEN, 1996). Após uma fase inicial na zona oceânica (3-5 anos), ocorre o recrutamento

das tartarugas-verdes juvenis para zona costeira, onde buscam área de alimentação e permanecem até alcançar a maturidade sexual (LUTZ; MUSICK; WYNEKEN, 1996, GODLEY et al., 2002; BRODERICK et al 2007). Dessa forma, a fase juvenil da tartaruga-verde e a maior parte do tempo de seu desenvolvimento ocorre na zona costeira, tornando-a mais vulnerável às ameaças da degradação do habitat (LUTZ; MUSICK; WYNEKEN, 1996). Considerados engenheiros ecossistêmicos dos ambientes costeiros por garantir a complexidade estrutural do habitat (COLEMAN; WILLIAMS, 2002), mega-herbívoros como a tartaruga-verde, têm função essencial para o controle de macroalgas conferindo saúde e resiliência aos recifes de corais (GOATLEY et al. 2012), além de proporcionar conectividade entre pradarias de gramas por dispersão de sementes e assim auxiliar na recuperação de habitats costeiros (TOL et al., 2017). Apesar do conhecimento sobre sua importância ecológica, estão classificadas como ameaçadas de extinção pela lista vermelha da International Union for Conservation of Nature (IUCN) (SEMINOFF, 2004) e na avaliação nacional do estado de conservação da fauna brasileira (MMA, 2018).

Os impactos derivados da caça e coleta de ovos (MCCLLENACHAN; JACKSON; NEWMAN, 2006) e pesca (intencional e acidental) são os principais responsáveis pelo declínio das populações de tartarugas-verdes (LEWISON, 2004; SENKO et al., 2013). Porém, outras ameaças crônicas colocam em risco a viabilidade das populações em médio e longo prazo, como as mudanças climáticas que causam o aumento de temperatura em áreas de desova das tartarugas-marinhas, desequilibra as proporções de machos e fêmeas e podem deixar algumas populações inviáveis para sobrevivência no futuro (JENSEN et al., 2018). Outras ameaças que ocorrem simultaneamente são a exposição à poluição causada pela falta de coleta ou tratamento de esgotos domésticos, industriais e agrícolas (GALLEN et al 2019) e a deposição de plástico nos mares que degrada o habitat e pode debilitar ou causar a morte de tartarugas marinhas direta ou indiretamente (KOMOROSKE et al., 2011; VAN HOUTAN, et al., 2014; SANTOS et al., 2015, 2020). Devido ao ciclo de vida majoritariamente costeiro das tartarugas-verdes, a degradação dos seus habitats afeta a saúde dessa espécie, tornando-a vulnerável à doenças como a fibropapilomatose (SANTOS,

2010; TAGLIOLATTO et al., 2016; JONES et al., 2016; SILVA-JÚNIOR et al. 2019)

2.4. Fibropapilomatose: histórico e etiologia

Além das ameaças apresentadas, as tartarugas marinhas também são acometidas por doenças, sendo a principal delas a fibropapilomatose (FP). A FP é caracterizada pela presença de lesões fibroepiteliais benignas simples ou múltiplas que podem ocorrer na parte externa do corpo como nadadeiras, regiões inguinal e axilar, olhos, pescoço e/ou nos órgãos internos desses animais, prejudicando algumas funções vitais para sobrevivência como natação ou alimentação, por exemplo (HERBST; KLEIN 1995, AGUIRRE et al., 2002). Apesar de já ter sido observada em todas as tartarugas marinhas, a tartaruga-verde é a espécie mais afetada (WILLIAMS, 1994).

O primeiro registro de FP em tartarugas marinhas ocorreu em uma tartaruga-verde na Flórida, em 1938, e a prevalência da doença na região era de 1,5% (SMITH; COATES, 1938). Nos anos 90, pesquisadores a consideraram como uma epidemia, com locais como na Flórida, com prevalência de 67%, ou regiões com mais de 90% como no Hawái ou em Barbados (BALAZS; POOLEY, 1991; HERBST, 1994; ADNYARA et al., 1997, CHALOUPKA; BALAZS 2005, FOLEY et al., 2005). Em meados dessa década de 90, a FP passou a ser considerada uma pandemia para tartarugas-verdes, afetando indivíduos na maioria da distribuição da espécie (WILLIAMS, 1994).

No Brasil, FP foi registrada pela primeira vez em 1986 (BAPTISTOTTE, 2007). A partir dos anos 2000, a prevalência da doença registrou tendência de aumento em áreas de alimentação, com média de 15% no país (BAPTISTOTTE, 2007). Entretanto, várias regiões apresentam índices mais altos em avaliações mais recentes como exemplo, o estudo de Espírito Santo, com 58% (SANTOS et al., 2010); São Paulo, com 41.6% (ROSSI et al., 2019); Rio de Janeiro, com 43% (TAGLIOLATTO et al., 2016); Rio Grande do Norte, com 35% (SILVA-JÚNIOR et al., 2019); Ceará, com cerca de 45% e Bahia, com 15% das tartarugas com FP (BAPTISTOTTE, 2016).

A etiologia da doença está associada à presença do *Chelonid alphaherpesvirus 5* (ChHV5) (QUACKENBUSH et al., 2001; HERBST et al., 2004; ENE et al. 2005;

RODENBUSCH et al., 2014). Este herpesvirus apresenta quatro tipos filogeográficos: no leste do Pacífico (abrange San Diego, Costa Rica e México); Atlântico Ocidental/Caribe Oriental (Flórida e de Barbados); Atlântico (Golfo da Guiné e Porto Rico); e centro-oeste do Pacífico (Austrália e Havaí) (PATRÍCIO et al., 2012). Como a distribuição das variantes está ligada às áreas de forrageamento das tartarugas e, em testes moleculares, não foi encontrada relação entre origem genética do hospedeiro e a variante viral, possivelmente o ChHV5 é transmitido de forma horizontal em zonas neríticas (JONES et al., 2020).

Esses diferentes tipos virais apresentam também diferenças nas suas formas e manifestação (SANTOS et al., 2010). Em tartarugas-verdes do Atlântico Sudoeste que tem a variante do Atlântico, a região dos membros anteriores era a mais frequentemente afetada pela FP (ROSSI et al., 2016; SANTOS et al., 2010; PAGE-KARJIAN et al., 2014; BAPTISTOTTE, 2007; SILVA-JÚNIOR et al., 2019) e a área menos frequente era no plastrão e nos olhos (ROSSI et al., 2016; SANTOS et al., 2010; SILVA-JÚNIOR et al., 2019). Em populações do Havaí que tem a variante do centro-oeste do Pacífico, os tumores orais causados pela FP são mais comuns (AGUIRRE et al., 2002).

Apesar da presença de ChHV5 estar intimamente relacionada à FP, autores observaram que a alta prevalência em áreas de alimentação das tartarugas-verdes coincide com regiões degradadas (HERBST, 1994; ENE et al., 2005, 2013; SANTOS et al., 2010; BAPTISTOTTE, 2007; SILVA-JÚNIOR et al., 2019) demonstrando forte relação entre FP e fatores ambientais. As causas relatadas são as mais diversas, como por exemplo, o impacto antrópico que possivelmente afeta a diversidade de macroalgas e conseqüentemente, a dieta das tartarugas-verdes (SANTOS, et al., 2011). A ingestão de lixo plástico também pode afetar a dieta e a condição corporal da espécie (SANTOS et al., 2020), o que pode favorecer a manifestação da FP. Além disso, em ambientes eutrofizados, comum em águas costeiras, as macroalgas concentram níveis elevados de arginina, aminoácido conhecido por regular atividade imunológica e promover o herpesvírus (VAN HOUTAN, 2010, 2014). Outros fatores que podem favorecer o desenvolvimento dos tumores são o aumento da temperatura da água (HERBST, 1994) e da incidência de raios UV (HERBST; KLEIN, 1995; DUFFY

et al., 2018). Ainda não se tem clareza sobre como a exposição das tartarugas-verdes aos poluentes urbanos afetam diretamente sua saúde a longo prazo (GALLEN, et al., 2019), apesar de forte correlação positiva entre prevalência de FP e regiões degradadas como próximas à agricultura, indústria e desenvolvimento urbano (ADNYANA et al., 1997; FOLEY et al., 2005; SANTOS et al., 2010).

O estudo e monitoramento da doença é considerado com uma das prioridades para conservação de tartarugas marinhas (HAMANN et al., 2010). Além disso, devido à sua alta correlação com a degradação costeira, o estudo da FP em tartarugas-verdes pode revelar informações importantes sobre a qualidade ambiental, e não por acaso a espécie é considerada sentinela ambiental (AGUIRRE; LUTZ, 2004).

Referências

- ADNYANA, W.; LADDS, P. W.; BLAIR, D. Observations of fibropapillomatosis in green turtles (*Chelonia mydas*) in Indonesia. **Australian Veterinary Journal**, v. 75, n. 10, p. 737-742, 1997.
- AGUIRRE, A. Alonso et al. Pathology of oropharyngeal fibropapillomatosis in green turtles *Chelonia mydas*. **Journal of aquatic animal health**, v. 14, n. 4, p. 298-304, 2002.
- AGUIRRE, A. Alonso; LUTZ, Peter L. Marine turtles as sentinels of ecosystem health: is fibropapillomatosis an indicator?. **EcoHealth**, v. 1, n. 3, p. 275-283, 2004.
- AL-BAHRY, Saif N. et al. Antibiotic resistant bacteria as bio-indicator of polluted effluent in the green turtles, *Chelonia mydas* in Oman. **Marine environmental research**, v. 71, n. 2, p. 139-144, 2011.
- BALAZS, George H.; POOLEY, Samuel G. Research plan for marine turtle fibropapilloma: results of a December 1990 workshop. 1991.
- BAPTISTOTTE, Cecília. **Caracterização espacial e temporal da fibropapilomatose em tartarugas marinhas da costa brasileira**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- BAPTISTOTTE, Cecília et al. Fibropapillomatosis in sea turtles from South America—Brazil, Uruguay, and Argentina. **Hargrove, S., Work, T., Brunson, S., Foley, AM, and Balazs, GH (Eds.). Proceedings of the International Summit on Fibropapillomatosis: Global Status, Trends, and Population Impacts. US Department of Commerce, NOAA Tech. Memor.** p. 22-25, 2016.
- BARBIER, Edward B. Marine ecosystem services. **Current Biology**, v. 27, n. 11, p. R507-R510, 2017.
- BLACKBURN, Sophie; PELLING, Mark; MARQUES, César. Megacities and the coast: Global context and scope for transformation. In: **Coasts and Estuaries**. Elsevier, 2019. p. 661-669.
- BLOOM, David E. 7 billion and counting. **Science**, v. 333, n. 6042, p. 562-569, 2011.
- BONANNO, Giuseppe; ORLANDO-BONACA, Martina. Perspectives on using marine species as bioindicators of plastic pollution. **Marine pollution bulletin**, v. 137, p. 209-221, 2018.
- BONANNO, Giuseppe; VYMAZAL, Jan. Compartmentalization of potentially hazardous elements in macrophytes: insights into capacity and efficiency of accumulation. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 181, p. 22-30, 2017.
- BOSSART, Gregory D. Marine mammals as sentinel species for oceans and human health. **Veterinary pathology**, v. 48, n. 3, p. 676-690, 2011.
- BREITBURG, Denise et al. Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. **Science**, v. 359, n. 6371, 2018.
- BRODERICK, Annette C. et al. Fidelity and over-wintering of sea turtles. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 274, n. 1617, p. 1533-1539, 2007.
- CHALOUPKA, Milani; BALAZS, George. Modelling the effect of fibropapilloma disease on the somatic growth dynamics of Hawaiian green sea turtles. **Marine Biology**, v. 147, n. 5, p. 1251-1260, 2005.
- COLEMAN, Felicia C.; WILLIAMS, Susan L. Overexploiting marine ecosystem engineers: potential consequences for biodiversity. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 17, n. 1, p. 40-44, 2002.
- DE SHERBININ, Alex; SCHILLER, Andrew; PULSIPHER, Alex. The vulnerability of global cities to climate hazards. **Environment and urbanization**, v. 19, n. 1, p. 39-64, 2007.

DIRRIGL JR, Frank J. et al. Use of the sea hare (*Aplysia fasciata*) in marine pollution biomonitoring of harbors and bays. **Marine pollution bulletin**, v. 129, n. 2, p. 681-688, 2018.

DONEY, S. C. (2010). The growing human footprint on coastal and open-ocean biogeochemistry. **Science**, 328(5985), 1512-1516.

DUFFY, David J. et al. Sea turtle fibropapilloma tumors share genomic drivers and therapeutic vulnerabilities with human cancers. **Communications biology**, v. 1, n. 1, p. 1-13, 2018.

ENE, Ada et al. Distribution of chelonid fibropapillomatosis-associated herpesvirus variants in Florida: molecular genetic evidence for infection of turtles following recruitment to neritic developmental habitats. **Journal of wildlife diseases**, v. 41, n. 3, p. 489-497, 2005.

FABRICIUS, Katharina E. et al. A bioindicator system for water quality on inshore coral reefs of the Great Barrier Reef. **Marine Pollution Bulletin**, v. 65, n. 4-9, p. 320-332, 2012.

FOLEY, Allen M. et al. Fibropapillomatosis in stranded green turtles (*Chelonia mydas*) from the eastern United States (1980–98): trends and associations with environmental factors. **Journal of Wildlife Diseases**, v. 41, n. 1, p. 29-41, 2005.

FOSSI, Maria Cristina; PANTI, Cristina. Sentinel Species of Marine Ecosystems. In: **Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science**. 2017.

FRÄNZLE, O. Bioindicators and environmental stress assessment. In: **Trace Metals and other Contaminants in the Environment**. Elsevier, 2003. p. 41-84.

GALLEN, Christie et al. Integrated chemical exposure assessment of coastal green turtle foraging grounds on the Great Barrier Reef. **Science of The Total Environment**, v. 657, p. 401-409, 2019.

GODLEY, B. J. et al. Long-term satellite telemetry of the movements and habitat utilisation by green turtles in the Mediterranean. **ECOGRAPHY**, v. 3, n. October 2001, p. 352–362, 2002.

GOATLEY, C. H. R.; HOEY, A. S.; BELLWOOD, D. R. The role of turtles as coral reef macroherbivores. **PLoS ONE**, v. 7, n. 6, 2012

GRIZZETTI, Bruna et al. Assessing water ecosystem services for water resource management. **Environmental Science & Policy**, v. 61, p. 194-203, 2016.

HALPERN, Benjamin S. et al. A global map of human impact on marine ecosystems. **Science**, v. 319, n. 5865, p. 948-952, 2008.

HALPERN, Benjamin S. et al. Spatial and temporal changes in cumulative human impacts on the world's ocean. **Nature communications**, v. 6, n. 1, p. 1-7, 2015.

HAMANN, Mark et al. Global research priorities for sea turtles: informing management and conservation in the 21st century. **Endangered species research**, v. 11, n. 3, p. 245-269, 2010.

HERBST, Lawrence H.; KLEIN, Paul A. Green turtle fibropapillomatosis: challenges to assessing the role of environmental cofactors. **Environmental Health Perspectives**, v. 103, n. suppl 4, p. 27-30, 1995.

HERBST, Lawrence H. Fibropapillomatosis of marine turtles. **Annual Review of Fish Diseases**, v. 4, p. 389-425, 1994.

HERBST, Larry et al. Tumor outbreaks in marine turtles are not due to recent herpesvirus mutations. **Current Biology**, v. 14, n. 17, p. R697-R699, 2004.

HUGHES, Terry P. et al. Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene. **Science**, v. 359, n. 6371, p. 80-83, 2018.

JENSEN, Michael P. et al. Environmental warming and feminization of one of the largest sea turtle populations in the world. **Current Biology**, v. 28, n. 1, p. 154-159. e4, 2018.

JONES, K. et al. A review of fibropapillomatosis in green turtles (*Chelonia mydas*). **The Veterinary Journal**, v. 212, p. 48-57, 2016.

JONES, K. et al. Molecular evidence for horizontal transmission of chelonid alphaherpesvirus 5 at green turtle (*Chelonia mydas*) foraging grounds in Queensland, Australia. **PloS one**, v. 15, n. 1, p. e0227268, 2020.

KOMOROSKE, Lisa M. et al. Pollutants and the health of green sea turtles resident to an urbanized estuary in San Diego, CA. **Chemosphere**, v. 84, n. 5, p. 544-552, 2011.

KONISHI, Hideo. Formation of hub cities: Transportation cost advantage and population agglomeration. **Journal of Urban Economics**, v. 48, n. 1, p. 1-28, 2000.

LEWISON, Rebecca L. et al. Understanding impacts of fisheries bycatch on marine megafauna. **Trends in ecology & evolution**, v. 19, n. 11, p. 598-604, 2004.

LOTZE, Heike K. et al. Depletion, degradation, and recovery potential of estuaries and coastal seas. **Science**, v. 312, n. 5781, p. 1806-1809, 2006.

LUTZ, P. L.; MUSICK, J. a.; WYNEKEN, J. The Biology of Sea Turtles. Volume II ed. [s.l.] CRC press, 1996.

MCCLLENACHAN, Loren; JACKSON, Jeremy BC; NEWMAN, Marah JH. Conservation implications of historic sea turtle nesting beach loss. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 4, n. 6, p. 290-296, 2006.

MCGRANAHAN, Gordon; BALK, Deborah; ANDERSON, Bridget. The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. **Environment and urbanization**, v. 19, n. 1, p. 17-37, 2007.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. Lista Nacional das Espécies da Fauna Brasileira Ameaçadas de Extinção. <<http://www.mma.gov.br/port/sbf/fauna/index.html>>.

ORFANIDIS, S.; PANAYOTIDIS, P.; STAMATIS, N. Ecological evaluation of transitional and coastal waters: a marine benthic macrophytes-based model. **Mediterranean marine science**, v. 2, n. 2, p. 45-66, 2001.

PAGE-KARJIAN, Annie et al. Factors influencing survivorship of rehabilitating green sea turtles (*Chelonia mydas*) with fibropapillomatosis. **Journal of Zoo and Wildlife Medicine**, v. 45, n. 3, p. 507-519, 2014.

PATRÍCIO, Ana R. et al. Novel insights into the dynamics of green turtle fibropapillomatosis. **Marine Ecology Progress Series**, v. 547, p. 247-255, 2016.

PIMIENTO, C. et al. Functional diversity of marine megafauna in the Anthropocene. **Science Advances**, v. 6, n. 16, p. eaay7650, 2020.

QUACKENBUSH, Sandra L. et al. Quantitative analysis of herpesvirus sequences from normal tissue and fibropapillomas of marine turtles with real-time PCR. **Virology**, v. 287, n. 1, p. 105-111, 2001.

ROSSI, Silmara et al. Challenges in evaluating the severity of fibropapillomatosis: a proposal for objective index and score system for green sea turtles (*Chelonia mydas*) in Brazil. **PloS one**, v. 11, n. 12, p. e0167632, 2016.

RODENBUSCH, C. R. et al. Fibropapillomatosis in green turtles *Chelonia mydas* in Brazil: characteristics of tumors and virus. **Diseases of aquatic organisms**, v. 111, n. 3, p. 207-217, 2014.

ROSSI, Silmara et al. Monitoring green sea turtles in Brazilian feeding areas: relating body condition index to fibropapillomatosis prevalence. **Marine Biological Association of the United**

Kingdom. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, v. 99, n. 8, p. 1879-1887, 2019.

SANTOS, Robson Guimarães et al. Relationship between fibropapillomatosis and environmental quality: a case study with *Chelonia mydas* off Brazil. **Diseases of aquatic organisms**, v. 89, n. 1, p. 87-95, 2010.

SANTOS, Robson G. et al. Coastal habitat degradation and green sea turtle diets in Southeastern Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, v. 62, n. 6, p. 1297-1302, 2011.

SANTOS, Robson Guimarães et al. Debris ingestion by juvenile marine turtles: an underestimated problem. **Marine pollution bulletin**, v. 93, n. 1-2, p. 37-43, 2015.

SANTOS, Robson G. et al. Exploring plastic-induced satiety in foraging green turtles. **Environmental Pollution**, v. 265, p. 114918, 2020.

SEMINOFF, J. A. *Chelonia mydas*. IUCN 2010. IUCN Red List of Threatened Species. Version 2010.4. 2004.

SENKO, Jesse et al. Bycatch and directed harvest drive high green turtle mortality at Baja California Sur, Mexico. **Biological Conservation**, v. 169, p. 24-30, 2014.

SILVA-JÚNIOR, Edson Soares da et al. Stranded Marine Turtles in Northeastern Brazil: Incidence and Spatial–Temporal Distribution of Fibropapillomatosis. **Chelonian Conservation and Biology: Celebrating 25 Years as the World's Turtle and Tortoise Journal**, v. 18, n. 2, p. 249-258, 2019.

SMALE, Dan A. et al. Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services. **Nature Climate Change**, v. 9, n. 4, p. 306-312, 2019.

SMALL, Christopher; NICHOLLS, Robert J. A global analysis of human settlement in coastal zones. **Journal of coastal research**, p. 584-599, 2003.

SMITH, G. M.; COATES, C. W. Fibro-epithelial growths of the skin in large marine turtles, *Chelonia mydas* (Linnaeus). **Zoologica**, v. 23, p. 93-98, 1938.

TAGLIOLATTO, Alicia Bertoloto et al. Characterization of fibropapillomatosis in green turtles *Chelonia mydas* (Cheloniidae) captured in a foraging area in southeastern Brazil. **Diseases of aquatic organisms**, v. 121, n. 3, p. 233-240, 2016.

TOL, Samantha J. et al. Long distance biotic dispersal of tropical seagrass seeds by marine mega-herbivores. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1-8, 2017.

VAN HOUTAN, Kyle S.; HARGROVE, Stacy K.; BALAZS, George H. Land use, macroalgae, and a tumor-forming disease in marine turtles. **PLoS One**, v. 5, n. 9, p. e12900, 2010.

VAN HOUTAN, Kyle S. et al. Eutrophication and the dietary promotion of sea turtle tumors. **PeerJ**, v. 2, p. e602, 2014.

WILLIAMS JR, Ernest H. et al. An epizootic of cutaneous fibropapillomas in green turtles *Chelonia mydas* of the Caribbean: part of a panzootic?. **Journal of Aquatic Animal Health**, v. 6, n. 1, p. 70-78, 1994.

3. TARTARUGAS-VERDES (*Chelonia mydas*) COMO ESPÉCIE SENTINELA: A RELAÇÃO DA DEGRADAÇÃO COSTEIRA COM A FIBROPAPILOMATOSE

Gabriela Miki Kuwai¹, João Vitor Campos-Silva^{1,2} e Robson Guimarães Santos¹

¹ Laboratório de Biologia Marinha e Conservação, Universidade Federal de Alagoas, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Cidade Universitária, 57072-900, Maceió, AL, Brasil;

² Faculty of Environmental Sciences and Natural Resource Management, Norwegian University of Life Sciences, Ås, Norway

Resumo

O uso de espécies sentinelas como as tartarugas-verdes (*Chelonia mydas*) pode ser uma maneira eficaz de monitorar ambientes degradados, considerando que o ecossistema marinho tem passado por grandes reestruturações e há iminente colapso dos serviços ecossistêmicos. A espécie é acometida pela fibropapilomatose (FP), doença debilitante caracterizada por tumores, com causa multifatorial, associada à presença de um herpesvirus e fortemente relacionada à degradação ambiental, apesar de não estar claro quais fatores e como essa relação ocorre. O presente trabalho analisou a variação espacial e temporal da FP em tartarugas-verdes no Atlântico Sudoeste através de criação de mapas de calor, além de testar a influência da urbanização - medida por *night light* (NL), saneamento básico (SB) e distância de rios - e a fase de vida das tartarugas baseada no comprimento curvilíneo da carapaça (CCC) com a prevalência e/ou severidade de FP por meio de modelos aditivos generalizados. Foram utilizadas informações advindas dos Projetos de Monitoramento de Praias de cerca de 13mil indivíduos enclachados ao longo de um gradiente latitudinal. Os resultados mostram que a prevalência da FP tem aumentado ao longo do tempo na maioria das regiões avaliadas, sugerindo possível intensificação da degradação costeira nas regiões. NL, SB e CCC parecem ser importantes na prevalência de FP, porém, outros fatores locais devem estar associados à manifestação da doença. O monitoramento de FP em tartarugas-verdes é importante não apenas para avaliar a pressão das atividades humanas na espécie, considerada ameaçada de extinção, mas também para acompanhar a qualidade de todo o ecossistema em que a tartaruga está inserida.

Palavras-chaves: Degradação ambiental, urbanização, impacto antrópico, tartarugas marinhas, bioindicador, tumor.

3.1. Introdução:

O contínuo aumento populacional humano associado ao crescente uso de recursos naturais é uma das principais causas de perda de biodiversidade (Boulton et al., 2016; Crist et al., 2017; Dirzo et al., 2014; Mora et al., 2011). Os ecossistemas terrestres são, historicamente, os mais profundamente atingidos, com altas taxas de extinções e rápida degradação ambiental (Dirzo et al., 2014). A degradação dos ecossistemas marinhos é relativamente mais recente quando comparada à ocorrida no meio terrestre, e acumula um número relativamente menor de extinção (McCauley et al., 2015). Porém, a pressão sobre os ecossistemas marinhos tem aumentando rapidamente nos últimos 200 anos (McCauley et al., 2015). A zona costeira, por exemplo, abriga três vezes mais que a densidade média global da população humana (Small & Nicholls, 2003) e acolhe 13% da população urbana mundial com tendência de crescimento (McGranahan et al., 2007).

Os impactos antrópicos nos ecossistemas marinhos estão aumentando em ritmo e intensidade, a tal ponto que já alteraram grande parte desses ambientes (Breitburg et al., 2018; Halpern et al., 2019; Lotze et al., 2006; McCauley et al., 2015). A alteração da linha da costa com estruturas artificiais, o despejo de poluentes, causado principalmente pelo déficit de saneamento básico, despejos de indústrias e atividades agrícolas e urbanização da costa são algumas das atividades antrópicas mais proeminentes no ecossistema costeiro e resultantes da alta densidade humana (Todd et al., 2019). Além disso, outras ameaças como as mudanças climáticas, pressionam ainda mais os ecossistemas marinhos (McCauley et al., 2015). A intensidade e magnitude desses e outros impactos podem levar ao colapso dos ecossistemas marinhos (Breitburg et al., 2018; Halpern et al., 2019; Jackson et al., 2001; Lotze et al., 2006) e interromper o fornecimento de bens e serviços ecológicos nas próximas décadas (Smale et al., 2019). Portanto, torna-se urgente monitorar a degradação do ambiente marinho para planejar as ações de conservação e recuperação. Caso contrário corremos

o risco de seguir uma trajetória similar à de diversos ecossistemas terrestres, provocando um grande número de extinções de organismos marinhos e perda de diversos serviços ecossistêmicos (McCauley et al., 2015).

Uma das maneiras de fazer esse monitoramento é utilizando espécies sentinelas que alertam sobre a qualidade do ecossistema antes do seu comprometimento funcional, sinalizando impacto negativo na saúde de indivíduos ou de populações (Bossart, 2011; Bonanno & Orlando-Bonaca, 2018). O uso de espécies que indicam alterações iniciais ou de longo prazo e oferecem informações com melhor custo-benefício, tornam-se ferramentas importantes para planejamentos de ações para conservação (Siddig et al., 2016).

Nos ecossistemas costeiros, uma espécie considerada sentinela ambiental é a tartaruga-verde (*Chelonia mydas*), atualmente ameaçada de extinção (Seminoff, 2004). Além da importância do seu papel ecológico, monitorar a espécie pode fornecer informações sobre a saúde do ecossistema (Aguirre & Lutz, 2004). O ciclo de vida predominantemente costeiro e razoável fidelidade às áreas de alimentação (Shimada et al., 2020) expõem as tartarugas-verdes às ameaças presentes na costa. Além disso, a longevidade da espécie e sua ampla distribuição favorecem o uso da espécie como sentinela da saúde do ecossistema (Berthet, 2015).

A tartaruga-verde é a espécie de tartaruga marinha mais acometida por uma doença neoplásica chamada fibropapilomatose (FP), considerada pandêmica para a espécie (Williams et al., 1994). A FP é caracterizada por lesões fibroepiteliais benignas simples ou múltiplas que podem ocorrer na parte externa e/ou na parte interna do corpo, atrapalhando algumas funções vitais para sobrevivência, como a natação e alimentação, a depender do local e tamanho do tumor (Aguirre et al., 2002; Herbst & Klein, 1995). A doença tem etiologia multifatorial, frequentemente relacionada à presença do *Chelonid alphaherpesvirus 5* (ChHV5) e ao nível de degradação ambiental (Adnyana et al., 1997; Aguirre & Lutz, 2004; Chaloupka & Balazs, 2005; Herbst & Klein, 1995; Herbst, 1994; Santos et al., 2010; Silva-Júnior et al., 2019). Outros fatores também podem estar relacionados à manifestação da doença, tais como a temperatura, a densidade populacional das tartarugas-verdes (Herbst & Klein,

1995), o nível de circulação de água no ambiente (Foley et al., 2005) e proximidade de desembocaduras de rios que por vezes descarregam poluentes criando pontos de eutrofização na costa (Christianen et al., 2012; Mascarenhas & Iverson, 2012). Além desses fatores individuais das tartarugas como a fase de vida, estimada pelo comprimento curvilíneo da carapaça (CCC) também estão ligadas à manifestação da doença, já que os juvenis são mais afetados (Foley et al., 2005; Poli et al., 2014; Santos et al., 2010; Silva-Júnior et al., 2019; Tagliolatto et al., 2016).

Considerando que o fator ambiental está fortemente associado à FP (Aguirre & Lutz, 2004; Herbst, 1994; Jones et al., 2016), atividades antrópicas que causam a degradação dos ecossistemas marinhos, como intensa alteração da zona costeira por urbanização e o aporte de poluentes devido ao déficit de saneamento básico das cidades litorâneas, podem estar ligadas a aumentos na prevalência e severidade da FP. A poluição advinda de áreas distantes também pode afetar diretamente os ecossistemas costeiros, pois corpos d'água que perpassam por áreas povoadas e/ou urbanas, ou com atividades industriais e agrícolas, podem receber poluentes antrópicos e desaguá-los no mar, elevando nível de contaminantes na região (Paulino et al., 2020; Pires et al., 2015).

Neste trabalho buscamos avaliar a variação temporal e geográfica da prevalência da doença e variação geográfica da severidade de FP, além de testar a relação entre fatores ambientais ligados à degradação do habitat, fase de vida das tartarugas e a manifestação da FP em tartarugas-verdes.

3.2. Materiais e Métodos:

Os dados das tartarugas-verdes foram coletados a partir de um banco de dados disponibilizados do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Este banco de dados é alimentado pelos Projetos de Monitoramento de Praias (PMPs), uma medida de avaliação de impactos estabelecida no processo de licenciamento ambiental conduzido pelo IBAMA, que tem como objetivo o monitoramento de encalhes de fauna marinha no litoral brasileiro.

Os dados avaliados representam cerca de 1.200 km de costa e mais de 13 mil animais distribuídos em um gradiente latitudinal ao longo da costa do Brasil. A

base de dados passou por uma sequência de filtros excluindo informações incertas ou incompletas dos dados utilizados no estudo como comprimento curvilíneo da carapaça (CCC), coordenadas de enalhe e de FP (Fig. 1). Além disso, desconsiderou-se carcaças mumificadas ou restos de esqueletos, pois nesses estados impossibilitam a obtenção de dados sobre FP. Tabela completa com os municípios avaliados está disponível em Material Suplementar (Tab. S1).

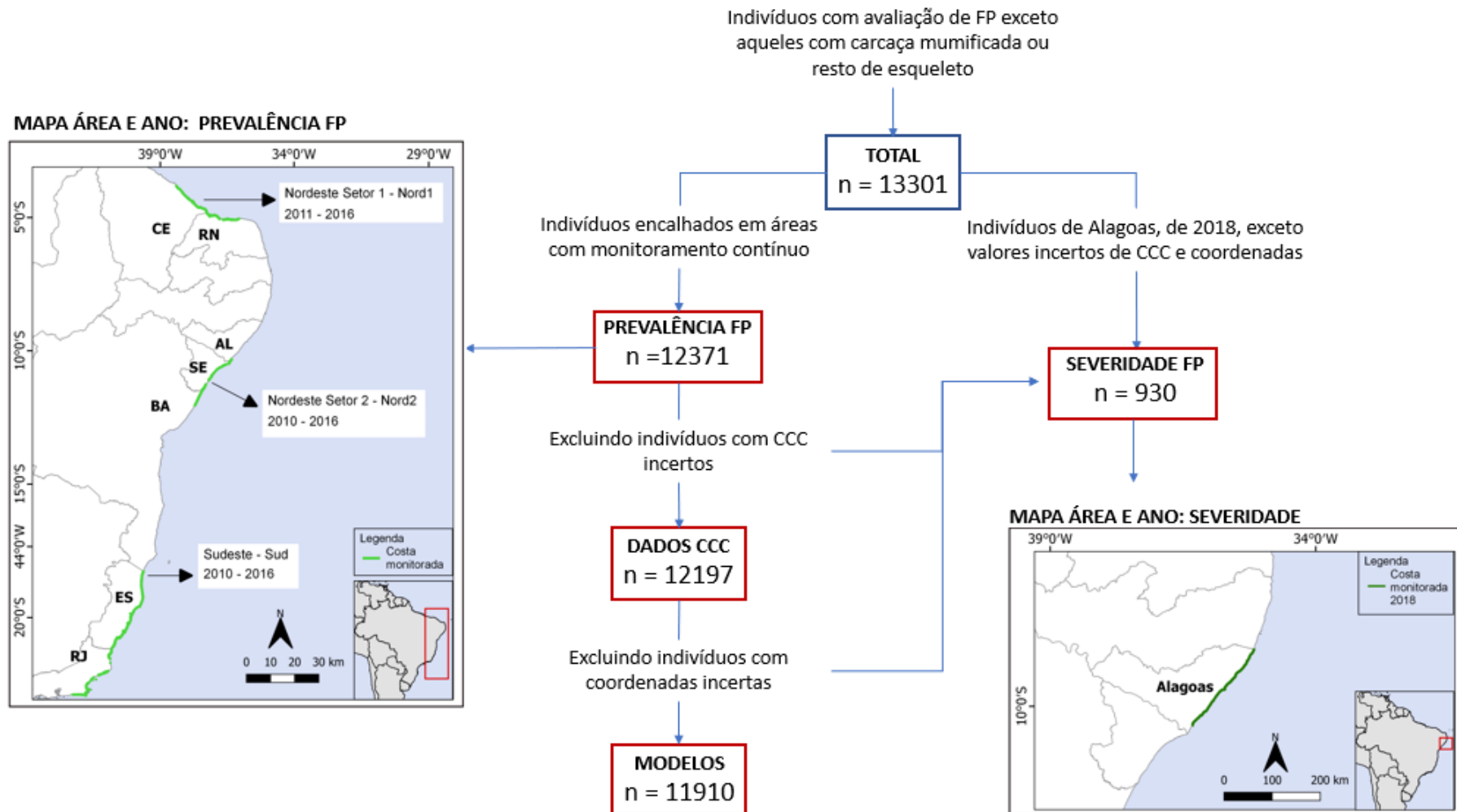


Figura 1. Fluxograma dos critérios utilizados para seleção dos dados de *Chelonia mydas*, as áreas e os anos avaliados. Cada título do quadro vermelho informa em qual análise esses dados foram utilizados, sendo FP: fibropapilomatose e CCC: comprimento curvilíneo da carapaça.

3.2.1. Prevalência e severidade de FP

Com as informações de presença e ausência de FP de 12371 indivíduos foi possível calcular a prevalência de cada área de encalhe com seguinte fórmula:

$$\text{Prevalência por área} = \text{tartarugas com FP} / \text{total de tartarugas} * 100$$

Para avaliação de severidade da FP, utilizamos os dados disponíveis de Alagoas, ano 2018 (Fig.1), com informações de 930 indivíduos. As tartarugas com FP tiveram os tumores quantificados e medidos pelo maior diâmetro para avaliar a severidade da doença. Foi utilizado a metodologia de ROSSI e colaboradores (2016) que tem base na classificação de tamanhos de tumores proposto por Work e Balazs (1999) e calcula o índice de fibropapilomatose (FPI) e classe de tamanho dos tumores, dando pesos diferentes para cada tamanho:

$$FPI = 0.1 \times NA + 1 \times NB + 20 \times NC + 40 \times ND$$

Em que NA é a quantidade de tumores de A (< 1cm); NB, a quantidade de tumores de classe de tamanho B (1 – 4cm); NC, quantidade de tumores de classe de tamanho C (>4 – 10cm) e ND quantidade de tumores de classe de tamanho D (> 10cm). A partir dos valores de FPI, foi possível classificar os indivíduos em três categorias de severidade: “leve” para FPI < 40, “moderado” para $40 \leq FPI < 120$ e “grave” para FPI ≥ 120

3.2.2. Fatores que influenciam FP

Devido à relação entre poluição e FP, escolhemos variáveis antrópicas que afetam diretamente a poluição marinha, portanto utilizamos: luz noturna ou *night light* (NL) como indicativo de urbanização da costa; porcentagem de saneamento básico (SB) por município; distância entre local de encalhe e desembocadura do rio mais próximo, considerando que a grande maioria dos rios sofre com despejo de dejetos ao longo do corpo d'água e quando desaguam podem criar um ponto de concentração de poluição no mar. Além disso, utilizamos também o tamanho dos animais, medido por comprimento curvilíneo da carapaça (CCC), como uma variável intrínseca que pode estar relacionada à manifestação da doença.

3.2.2.1. *Night light* (NL)

Para estimar a degradação ambiental foram usadas informações sobre a urbanização na costa medido pelo NL, altamente correlacionado com a

ocupação humana (Shi et al., 2014). Essa presença está fortemente relacionada à exploração de recursos marinhos, à poluição ligada ao esgoto e escoamento urbano, e ao desenvolvimento de infraestrutura para economia (construção de portos, por exemplo) ou para defesa costeira (Todd et al., 2019).

Os dados de NL foram extraídos a partir de imagens *rasters* integradas e intercalibradas dos sensores *Operational Linescan System* (OLS) e *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS) disponibilizado por Li e colaboradores (2020) referentes aos anos de 2010 a 2016. A resolução das imagens é de 30 arcos de segundo (cerca de 1km) e contém *digital numbers* (DN) que variam de 0 a 63. A cada coordenada de uma tartaruga foi aplicado um *buffer* de 10km de diâmetro representando seu habitat. A porção terrestre do *buffer* foi utilizada para capturar os valores de NL de cada pixel contido dentro do *buffer* e assim calcular a média. Esses procedimentos foram realizados no QGIS 3.1.

3.2.2.2. Saneamento básico (SB)

Os dados de saneamento básico (SB) foram coletados a partir das informações disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas (ANA), do último censo publicado em 2013. A menor resolução disponível pela ANA são os dados por município e são apresentados em porcentagem da área municipal com cobertura sanitária.

3.2.2.3. Distância da desembocadura de rios

A distância da desembocadura de rio dos pontos de encalhes de tartarugas também foi relacionada com a severidade da doença. Os pontos de desembocaduras e o contorno dos rios foram desenhados a partir de imagens do *Google Earth* disponibilizados pelo complemento “*quickmapservice*” do Qgis. A distância de rios entre os pontos de encalhe foram calculadas no mesmo programa utilizando o algoritmo “Distância para o Ponto Central mais Próximo”.

3.2.2.4. Fases da vida da tartaruga

Devido à dificuldade em determinar a idade das tartarugas marinhas (Lutz et al., 1996), considera-se o comprimento curvilíneo da carapaça (CCC) para estimar a fase de vida dos indivíduos. Tagliolatto e colaboradores (2020), realizando

estudos no Atlântico Sudoeste, considerou filhotes e juvenis oceânicos tartarugas com CCC ≤ 30 cm, juvenis com > 30 cm e < 90 cm e subdultos e adultos com CCC ≥ 90 cm.

3.2.3. Evolução temporal e variação geográfica da FP

Para avaliação temporal da prevalência, foram utilizados dados dos anos de 2010 ou 2011 a 2016, período em que todas as áreas foram monitoradas e foram analisados 12371 indivíduos distribuídos nas três regiões. A partir dos dados de prevalência, foram feitas regressões lineares entre as taxas de prevalências e os anos avaliados para testar o padrão da doença ao longo do tempo. Tais análises foram feitas no programa R.

Foram gerados mapas de calor para avaliação geográfica da prevalência de FP, considerando prevalências por município e de forma bianual de 2010 até 2016, para melhor visualização dos dados no mapa. Imagens de NL com ano correspondente também foi inserido no mapa. Os mapas foram gerados no programa de geoprocessamento QGIS 3.1 e aplicado o algoritmo de Kernel com valores de prevalência como peso para elaboração do mapa de calor.

Para a avaliação da variação geográfica da severidade de FP em Alagoas, a área de estudo foi dividida em trechos de 10km e para cada trecho foi atribuído o valor da média de FPI de todas tartarugas encalhadas de cada trecho. Após o cálculo foi aplicado o algoritmo de Kernel com valores de médias como peso para elaboração do mapa de calor. No mapa também foi adicionado imagem de NL de 2018 (ano de referência dos dados) e marcações de rios presentes na área de estudo.

3.2.4. Análises estatísticas

Em termos de prevalência de FP, testamos se NL, SB e CCC apresentam influência na ausência ou presença (0 ou 1) de FP entre as três regiões avaliadas e no Brasil como todo. As três regiões apresentam diferenças significativas entre as variáveis NL, SB e CCC, o que suporta a avaliação de modelos independentes nessas três áreas diferentes (Tab. S2). Após observação de baixa colinearidade entre as variáveis nas regiões Nord1 e Sud, o modelo aplicado foi $FP \sim NL + SB$

+ CCC. A região Nord2 apresentou correlação alta entre NL e SB (Fig. S1) e, portanto, o modelo utilizado nessa região em específico foi $FP \sim NL + CCC$.

Utilizamos o modelo aditivo generalizado (MAG) que ajusta o modelo de uma relação linear adicionando preditores não paramétricos, suavizando-os. Foram considerados presença e ausência de FP e cada indivíduo como uma unidade amostral. As análises foram feitas no R versão 3.6.1, utilizando o pacote “mgcv”, considerando um nível de significância de 0.95.

Para analisar em qual fase de vida as tartarugas-verdes são mais acometidas, consideraram-se os indivíduos que tinham informações sobre FP e CCC, resultado em 12197 tartarugas-verdes (Fig. 1). As tartarugas foram divididas em classes de tamanho de 10 em 10 cm, e a prevalência foi calculada por classes a partir de 25 cm de CCC, pois indivíduos menores de 25 cm representaram apenas 0.33% do total avaliado.

Sobre as variáveis que afetam a severidade da doença depois que ela se manifesta, foram considerados indivíduos com tumores e índice de FPI > 0 como variável resposta e NL, distância entre rios e CCC como variáveis explicativas, já que na análise de colinearidade, NL e SB estavam fortemente correlacionados (Fig. S2). Portanto, o MAG aplicado para severidade foi $FPI \sim NL + \text{distância de rio} + CCC$.

4.3. Resultados

4.3.1. Prevalência de FP:

A prevalência da FP no Brasil aumentou ao longo do tempo avaliado (Fig. 2). Os mapas confirmam o aumento, visto que as manchas vermelhas que indicam prevalência alta de FP expandem pela costa (Fig. 3 e Fig. S3 para animação de prevalência por ano). Informações mais detalhadas sobre FP nos estados avaliados podem ser vistas no Material Suplementar (Tab. S3) e para a Bacia Potiguar (Nord1), ver também Silva-Júnior e colaboradores (2019).

Prevalência de Fibropapilomatose (FP)

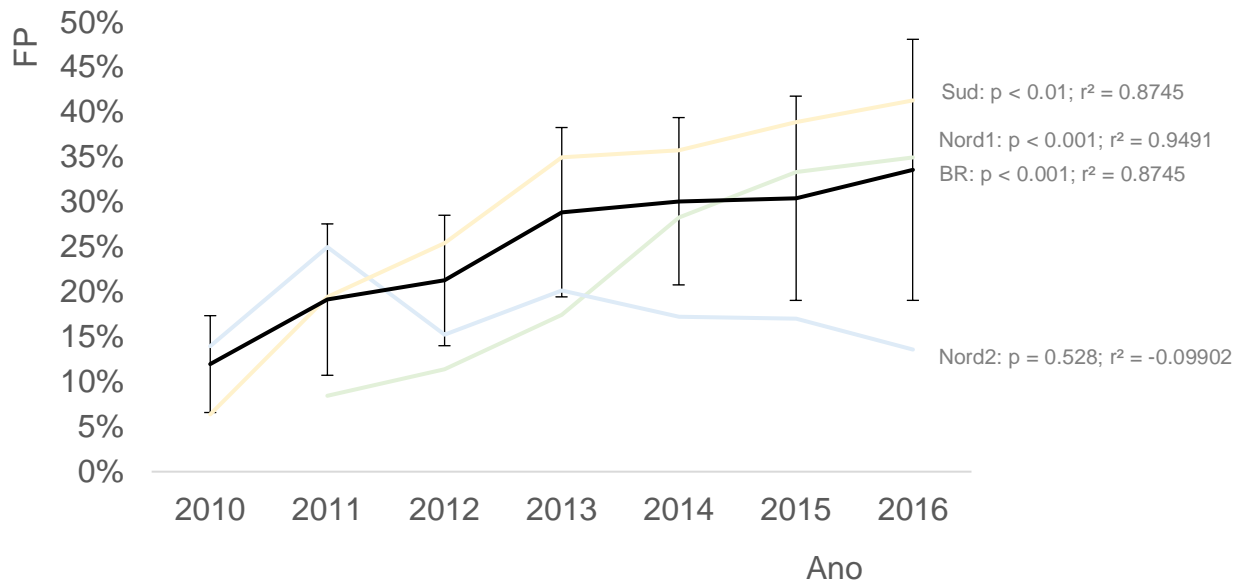


Figura 2. Prevalência de fibropapilomatose em *Chelonia mydas* encalhadas no Brasil por ano nas regiões do Nordeste – Setor 1 (Nord1, linha verde), Nordeste – Setor 2 (Nord2, linha azul) e Sudeste (Sud, linha amarela) e a média e desvio padrão do país (BR, linha preta) ao longo do tempo. Valores dos testes de correlação de *Pearson* estão ao lado das linhas do gráfico.

Mapa de prevalência de FP no Brasil

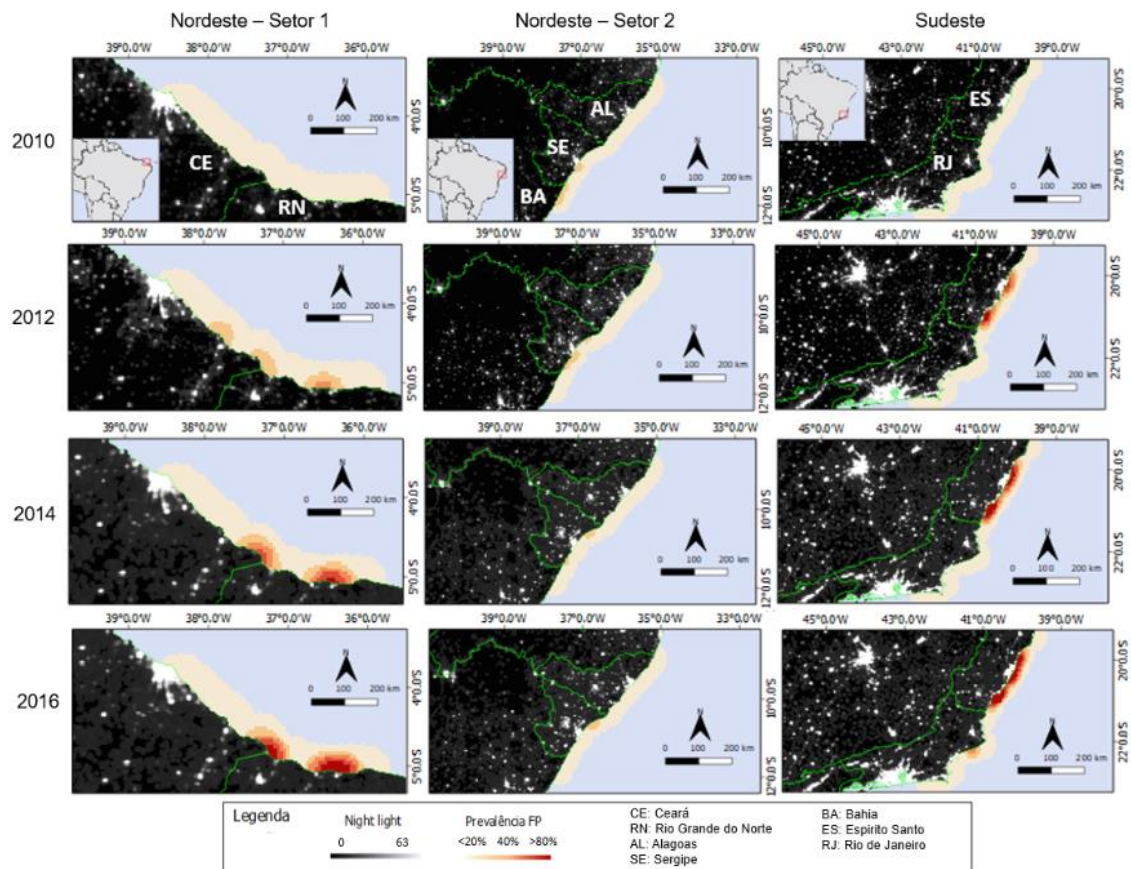


Figura 3. Prevalência da fibropapilomatose em *Chelonia mydas* com avaliações bianuais, nas três regiões do Brasil, com os dados de *night light* indicando urbanização referente a cada ano.

Os modelos sobre as influências das variáveis na prevalência de FP avaliados por região e no Brasil apresentaram relações significativas, mas explicam parcialmente a manifestação da doença. A maioria dos modelos mostram a relação significativa e positiva entre prevalência e NL e relação significativa e negativa de prevalência e SB. A variável CCC apresentou significância geral da suavização em todos modelos (Fig. 4).

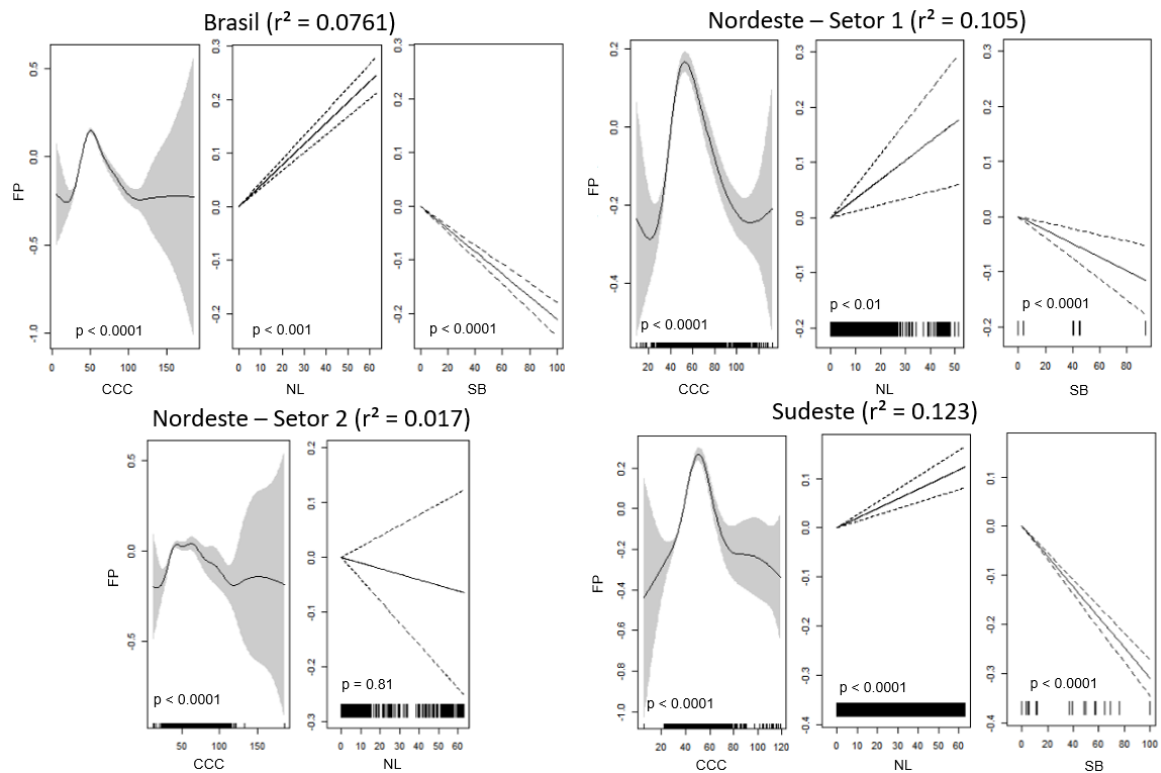


Figura 4. Gráficos resultantes do modelo aditivo generalizado, mostrando os efeitos de NL = *night light* representando urbanização, SB = saneamento básico e CCC = comprimento curvilíneo da carapaça sobre a prevalência de FP de *Chelonia mydas*, conforme o modelo $FP \sim NL + SB + CCC$ para o Nordeste – Setor 1 e Sudeste. Em Nordeste – Setor 2, houve colinearidade entre NL e SB, portanto, o modelo foi $FP \sim NL + CCC$. Foram considerados dados gerais (Brasil) e divididos por regiões (Nordeste – Setor 1 e 2 e Sudeste).

A avaliação de prevalência por classes de tamanho mostrou que a prevalência aumenta gradualmente até as classes de tamanho de 45 a 54cm, de 55 a 64cm, e diminui nos indivíduos maiores (Fig. 5).

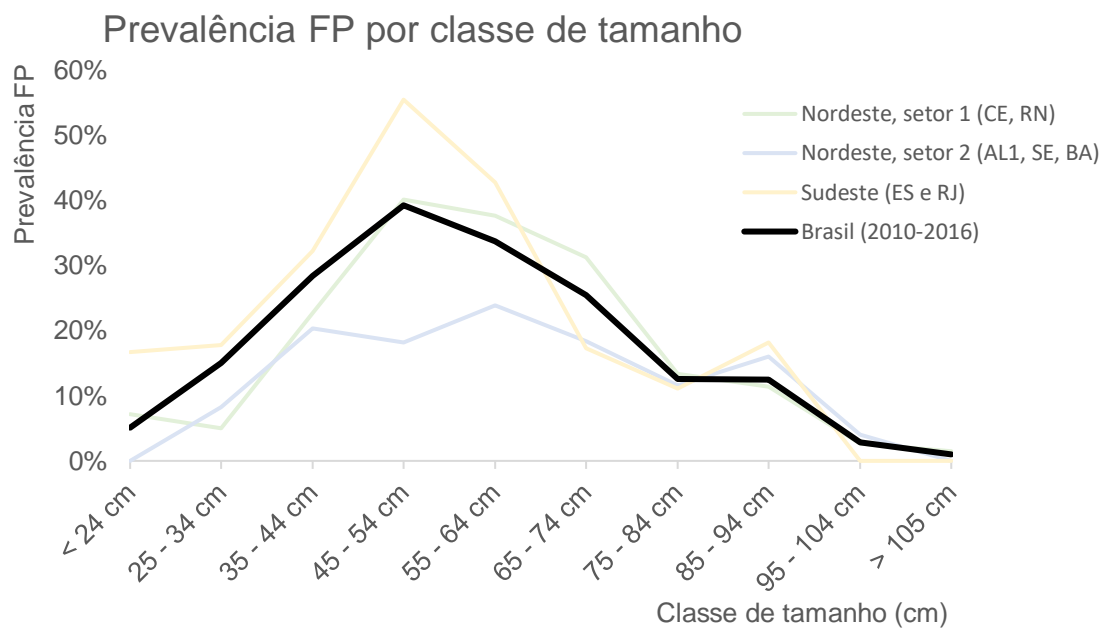


Figura 5. Prevalência de fibropapilomatose em *Chelonia mydas* por classe de tamanho das tartarugas-verdes encontradas encalhadas em determinadas regiões da costa do Brasil dividido por regiões monitoradas, de 2010 a 2016.

4.3.2. Sobre a severidade de FP

Na avaliação de mapa de calor sobre severidade, ela não parece ter relação entre NL e proximidades aos rios, já que as áreas vermelhas são vistas tanto em áreas com valores altos e baixos de NL quanto em áreas próximas ou distantes de desembocaduras de rios (Fig. 6).

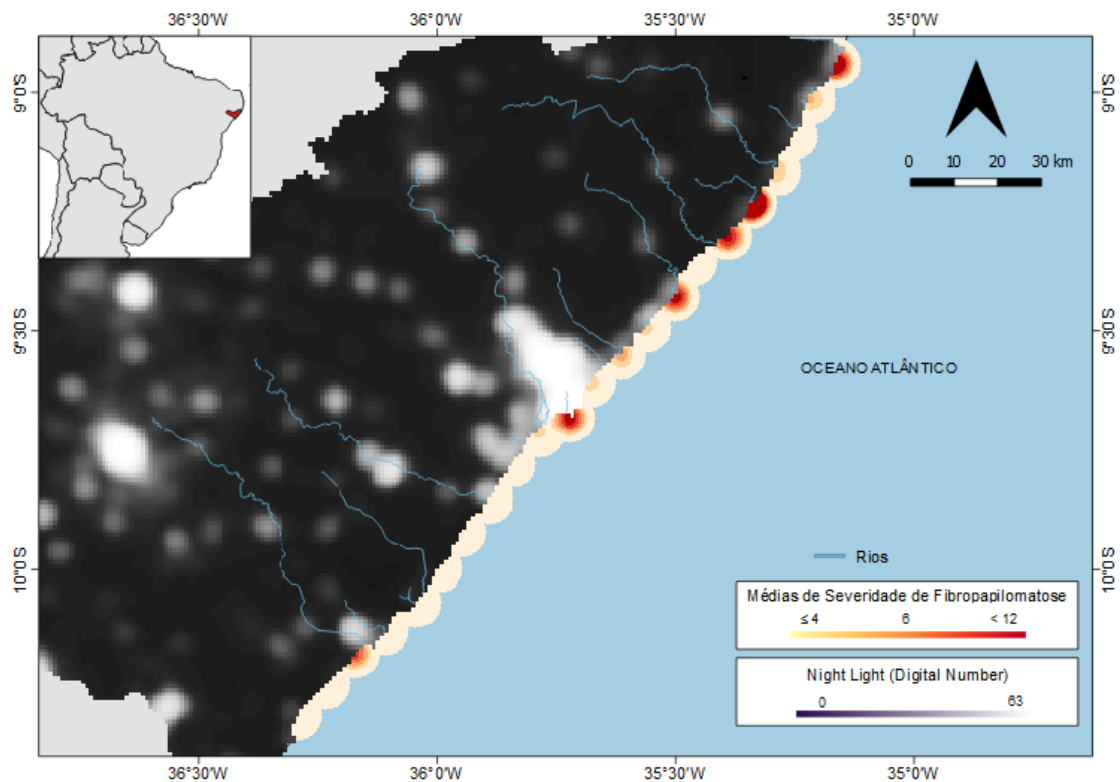


Figura 6. Mapa com médias de índice de severidade da fibropilomatose de *Chelonia mydas*, com rios e *night light* em Alagoas - Brasil, referente aos dados de 2018.

Quando observamos as variáveis que influenciam a severidade de FP após sua manifestação, o modelo aplicado não apresenta alto poder de explicação ($r^2 = 0.0571$), o que pode indicar que outros fatores de impacto local podem estar relacionados à severidade (Fig. 7).

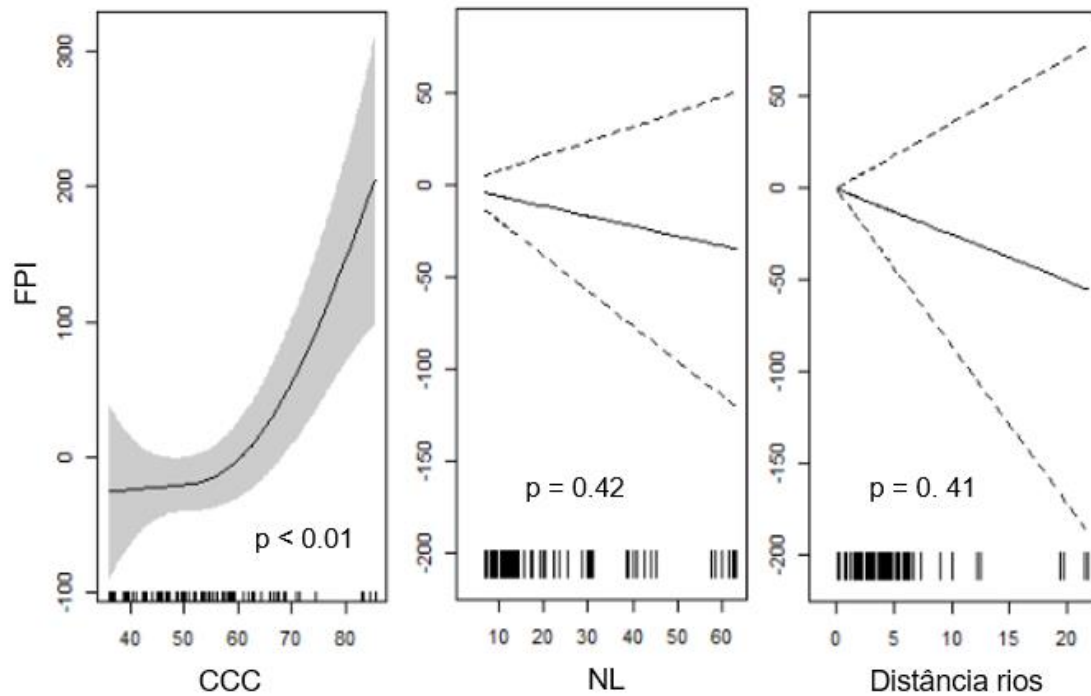


Figura 7. Resultado do modelo de regressão linear do índice de severidade da fibropapilomatose de *Chelonia mydas* em Alagoas em relação ao CCC = comprimento curvilíneo da carapaça, NL = *night light* e Dist. rio = distância de rio, usando o seguinte modelo: $FPI \sim CCC + NL + \text{distância de rio}$ que apresentou $r^2 = 0.0571$.

4.4. Discussão

O crescimento da prevalência de FP na costa brasileira observado neste estudo é preocupante, não somente para as populações de tartarugas-verdes como para a qualidade dos ecossistemas costeiros. Outros estudos em menor escala também apontam para esta tendência de aumento ao longo do tempo (Silva-Júnior et al., 2019; Tagliolatto et al., 2016). Estes resultados também estão alinhados com o encontrado em uma escala geográfica maior, que mostra que Atlântico Sul, apresenta rápido aumento e projeção de crescimento dos efeitos cumulativos dos estressores antrópicos, exibindo alto risco de colapso do ecossistema (Halpern et al., 2019). Essa pressão exercida nos oceanos possivelmente é um fator determinante no crescente registro de tumores em populações de outros animais marinhos, como adenocarcinoma intestinal em baleias beluga e outros tipos de cânceres em leões marinhos e peixes (Giraudeau et al., 2018).

A urbanização da zona costeira e o baixo nível de saneamento básico são apenas algumas das pressões antrópicas que podem indicar o nível de poluição sofridas pelos organismos marinhos. A urbanização é uma boa maneira de medir a degradação ambiental, pois está associada à densidade populacional que por sua vez tem relação significativa e negativa com a biodiversidade e o bom funcionamento do ecossistema (Mora et al., 2011). Não por acaso, o padrão geral observado foi de áreas mais urbanizadas (i.e. com maiores índices de NL) apresentarem maiores prevalências de FP neste e em outros estudos (Rossi et al., 2019; Santos et al., 2010). Os resultados dos modelos podem indicar a influência de outros fatores na manifestação de FP, como poluentes químicos mais específicos. Estudos que fazem avaliação histológica dos tecidos de tartarugas-verdes, por exemplo, encontraram relações entre FP e ingestão de algas com concentração de arginina, provocada por eutrofização da região (Van Houtan 2014), exposição por poluentes orgânicos persistentes (POPs) derivados da agricultura e da indústria (Sánchez-Sarmiento, 2017) e acúmulo de metais pesados (Komoroske, 2011). Além disso, apesar dos poluentes presentes no habitat das tartarugas, ainda existem diferenças na resposta imunológica de cada indivíduo (Griffin et al., 2010). Considerando a infecção viral por herpesvirus, a densidade demográfica das populações de tartarugas-verdes também pode ser outro fator significativo para manifestação da doença (Herbst & Klein, 1995; Yetsko et al., 2020). Considerando que FP é uma doença neoplásica e de etiologia multifatorial, espera-se que um conjunto de condições esteja afetando a expressão da doença em tartarugas-verdes devido às relações complexas entre infecção, câncer e poluentes químicos (Baines et al., 2021).

A maior prevalência de FP em juvenis de tartarugas-verdes e decréscimo nos adultos encontrado em nossa avaliação é comumente relatado em outros estudos (Adnyana et al., 1997; Baptistotte, 2007; Foley et al., 2005; Poli et al., 2014; Santos et al., 2010; Silva-Júnior et al., 2019; Tagliolatto et al., 2016). Foley e colaboradores (2005) sugerem algumas hipóteses para diminuição de prevalência em indivíduos adultos. Primeiramente, o desenvolvimento de resistência conferida pela idade e/ou é resultado da mortalidade dos indivíduos antes de chegar à idade adulta. A regressão completa ou parcial dos tumores FP já foi observada em diversas regiões em períodos de tempo variando de 13 dias

a cerca de 3 anos (Guimarães et al., 2013; Herbst, 1994; Patrício et al., 2016; Tagliolatto et al., 2016) e como consequência, pode ocorrer a redução da prevalência de FP.

Tartarugas-verdes recém recrutadas para zona costeira passam por diversos estressores fisiológicos ligados ao deslocamento e às mudanças de habitat (Ene et al., 2005; Flint et al., 2010). Esses estressores podem provocar alterações no condicionamento imunológico desses indivíduos e corroborar com a segunda hipótese para uma maior ocorrência de FP em tartarugas imaturas, já que além dos estressores, o recrutamento e fidelização das tartarugas-verdes ocorre na zona costeira fortemente impactada por poluição e alteração ambiental (Gallen et al., 2019). Além dos fatores ambientais costeiros serem o gatilho para manifestação da doença (Ene et al., 2005) a exposição ao ChHV5 também parece ser mais comum nesse ambiente. A homogeneidade na distribuição das variantes virais de ChHV5 encontradas em áreas de forrageamento demonstra a transmissão horizontal ocorrida nessas áreas, pois se a transmissão ocorresse verticalmente ou na fase oceânica a distribuição viral em áreas de alimentação seria mais heterogênea devido à origem dessas populações serem compostas por estoques mistos (Ene et al., 2005; Jones et al., 2020). Um estudo recente usando a técnica de DNA ambiental, em que coleta e identifica fragmentos de DNA de amostras ambientais, demonstrou que os tumores de FP são fonte de disseminação viral e a retirada cirúrgica diminuiu o nível de ChHV5 na coluna d'água (Yetsko et al., 2020). A disseminação viral é preocupante em áreas de alta densidade de tartarugas-verdes, considerando que indivíduos gravemente afetados por FP podem facilitar a transmissão da doença (Herbst & Klein, 1995).

A severidade da doença é outro fator a se considerar na avaliação de FP, pois o tamanho e a quantidade de tumores afetam diretamente a qualidade de vida do indivíduo (Herbst & Klein, 1995; Work & Balazs, 1999) e pode aumentar a carga viral na coluna d'água (Yetsko et al., 2020). Apesar da severidade da FP aparentar estar relacionada às desembocaduras de rios conforme o mapa, os modelos estatísticos propostos não mostram essa associação. Em uma avaliação da qualidade da água dos rios da área estudada, no mesmo ano de coleta dos dados de FP, foi observada contaminação por dejetos humanos, com representação de microorganismos associados a esgoto (Paulino et al., 2020)

condizendo com os baixos valores de saneamento básico dos municípios, que não atinge mais de 5% de cobertura sanitária. Possivelmente, outros impactos locais interferem na manifestação da doença e estar relacionados às variações geográficas, tanto de severidade quanto de prevalência de FP.

A relação significativa e positiva de CCC e severidade de FP observada no modelo permite o alinhamento das duas hipóteses para diminuição da taxa de prevalência da doença entre as tartaruga-verdes adultas. Se a severidade da FP em tartarugas-verdes aumenta conforme elas crescem, os acometidos que não se curaram da doença tem maiores chances de mortalidade por não resistirem às consequências da doença que podem se tornar mais severas com passar do tempo (Foley et al., 2005).

A avaliação da severidade pode fornecer informações adicionais sobre a intensidade do impacto sofrido pelas tartarugas-verdes, pois a gravidade da FP pode ser diferente mesmo em áreas com prevalências semelhantes. Ademais, a quantidade de tumores e onde eles ocorrem pode afetar a sobrevivência, crescimento e reprodução dos indivíduos acometidos (Adnyana et al., 1997; Balazs et al., 1998; Torezani et al., 2010). Os tipos virais de ChVH5 também influenciam na forma de manifestação dos tumores e podem ser mais graves, como ocorre no Havaí onde as tartarugas comumente apresentam tumores orais (Work et al., 2004), diferente da FP que ocorre no Brasil que afeta principalmente os membros anteriores (Rossi et al., 2016; Santos et al., 2010; Baptistotte 2007; Silva-Júnior et al. 2019). Além do tipo, o limite da carga viral também pode estar relacionado ao desenvolvimento de tumores (Jones et al., 2016). Se o agente infeccioso está associado à zona costeira, numa área fortemente impactada por estressores antrópicos, avaliar como a poluição afeta os mecanismos de transmissibilidade e sobrevivência do herpesvirus também podem auxiliar na compreensão da doença, já que a combinação de estressores podem aumentar a transmissão ou provocar o surgimento dos tumores em tartarugas infectadas de forma latente (Ritchie, 2006; Morley, 2010).

Este trabalho sugere que a avaliação das tartarugas-verdes pode fornecer mais informações sobre a qualidade do ecossistema em que está inserido, possibilitando avaliações mais abrangentes sobre a degradação do ambiente

costeiro. Além disso, devido às características biológicas da espécie, é possível avaliar mudanças ambientais em escalas temporais e espaciais, conforme os resultados vistos. Portanto, avaliar a FP em tartarugas-verdes pode ser uma forma de monitoramento eficaz no nível do ecossistema e de baixo custo financeiro a depender da análise.

4.5. Conclusão

A FP é uma doença panzoótica preocupante para tartarugas-verdes e está fortemente associada à degradação ambiental, fazendo com que a espécie seja considerada sentinela ambiental. O aumento da prevalência de FP ao longo dos anos monitorados nas regiões analisadas é um alerta sobre a degradação dos ecossistemas marinhos. Urbanização, saneamento básico e fases da vida das tartarugas estão relacionadas à manifestação da FP, mas fatores locais também parecem estar influenciando a manifestação da doença. Portanto, é necessário compreender quais fatores ambientais e como eles estão associados à FP, como por exemplo, as consequências da interação dos poluentes químicos presente nos mares na saúde das tartarugas-verdes e na sobrevivência e transmissibilidade do ChHV5.

4.6. Referencial bibliográfico

- Adnyana, W., Ladds, P. W., & Blair, D. (1997). Observations of fibropapillomatosis in green turtles (*Chelonia mydas*) in Indonesia. *Australian Veterinary Journal*, 75(10), 737–742.
- Aguirre, A. A., Balazs, G. H., Spraker, T. R., & Murakawa, S. K. K. (2002). Pathology of Oropharyngeal Fibropapillomatosis in Green Turtles *Chelonia mydas*. *Journal Of Aquatic Animal Health*, October 2011, 37–41. [https://doi.org/10.1577/1548-8667\(2002\)0142.0.CO](https://doi.org/10.1577/1548-8667(2002)0142.0.CO)
- Aguirre, A. A., & Lutz, P. L. (2004). Marine Turtles as Sentinels of Ecosystem Health: Is Fibropapillomatosis an Indicator? *EcoHealth*, 1(3), 275–283. <https://doi.org/10.1007/s10393-004-0097-3>
- Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (2013). Atlas Esgotos Situação 2013 - Remoção da Carga de Esgotos Gerada na Sede Municipal. https://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/1bf952cbf5314d57882272656438dc1f_1?geometry=-130.339%2C-29.356%2C27.513%2C0.118
- Balazs, G. H., Puleloa, W., Medeiros, E., Murakawa, S. K., & Ellis, D. M. (1998). Growth rates and incidence of fibropapillomatosis in Hawaiian green turtles utilizing coastal foraging pastures at Palaau, Molokai. *Proceedings of the Seventeenth Annual Sea Turtle Symposium, March*, 130–132.

- Baines, C., Lerebours, A., Thomas, F., Fort, J., Kreitsberg, R., Gentes, S., ... & Sepp, T. (2021). Linking pollution and cancer in aquatic environments: A review. *Environment International*, 149, 106391.
- Baptistotte, C. (2007). *Caracterização espacial e temporal da fibropapilomatose em tartarugas marinhas da costa brasileira* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- Bonanno, G., & Orlando-Bonaca, M. (2018). Perspectives on using marine species as bioindicators of plastic pollution. *Marine pollution bulletin*, 137, 209-221.
- Bossart, G. D. (2011). Marine mammals as sentinel species for oceans and human health. *Veterinary pathology*, 48(3), 676-690.
- Boulton, A. J., Ekeboom, J., & Gíslason, G. már. (2016). Integrating ecosystem services into conservation strategies for freshwater and marine habitats: a review. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 26(5), 963–985. <https://doi.org/10.1002/aqc.2703>
- Berthet, B. (2015). Reference Species. *Aquatic Ecotoxicology*, 205–227. doi:10.1016/b978-0-12-800949-9.00009-7
- Breitburg, D., Levin, L. A., Oschlies, A., Grégoire, M., Chavez, F. P., Conley, D. J., Garçon, V., Gilbert, D., Gutiérrez, D., Isensee, K., Jacinto, G. S., Limburg, K. E., Montes, I., Naqvi, S. W. A., Pitcher, G. C., Rabalais, N. N., Roman, M. R., Rose, K. A., Seibel, B. A., ... Zhang, J. (2018). Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science*, 359(6371). <https://doi.org/10.1126/science.aam7240>
- Chaloupka, M., & Balazs, G. (2005). Modelling the effect of fibropapilloma disease on the somatic growth dynamics of Hawaiian green sea turtles. *Marine Biology*, 147(5), 1251–1260. <https://doi.org/10.1007/s00227-005-0026-1>
- Crist, E., Mora, C., & Engelman, R. (2017). The interaction of human population, food production, and biodiversity protection. *Science*, 264(April), 260–264.
- Christianen, M. J., Govers, L. L., Bouma, T. J., Kiswara, W., Roelofs, J. G., Lamers, L. P., & van Katwijk, M. M. (2012). Marine megaherbivore grazing may increase seagrass tolerance to high nutrient loads. *Journal of Ecology*, 100(2), 546-560.
- Dirzo, R., Young, H. S., Galetti, M., Ceballos, G., Isaac, N. J. B., & Collen, B. (2014). Defaunation in the Anthropocene. *Science*, 345(6195), 401–406. <https://doi.org/10.1126/science.1251817>
- Ene, A., Su, M., Lemaire, S., Rose, C., Lenz, J., Herbst, L. H., Schaff, S., & Moretti, R. (2005). Distribution of Chelonid Fibropapillomatosis-Associated Herpesvirus Variants in Florida: Molecular Genetic Evidence for Infection of Turtles Following Recruitment To Neritic Developmental Habitats. *Journal of Wildlife Diseases*, 41(3), 489–497. <https://doi.org/10.7589/0090-3558-41.3.489>
- Flint, M., Morton, J. M., Limpus, C. J., Patterson-Kane, J. C., Murray, P. J., & Mills, P. C. (2010). Development and application of biochemical and haematological reference intervals to identify unhealthy green sea turtles (*Chelonia mydas*). *Veterinary Journal*, 185(3), 299–304. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2009.06.011>
- Foley, A. M., Teas, W. G., Fick-Child, K. J., Schroeder, B. A., & Redlow, A. E. (2005). Fibropapillomatosis in Stranded Green Turtles (*Chelonia mydas*) From the Eastern

- United States (1980–98): Trends and Associations With Environmental Factors. *Journal of Wildlife Diseases*, 41(1), 29–41. <https://doi.org/10.7589/0090-3558-41.1.29>
- Gallen, C., Heffernan, A. L., Kaserzon, S., Dogruer, G., Samanipour, S., Gomez-Ramos, M. J., & Mueller, J. F. (2019). Integrated chemical exposure assessment of coastal green turtle foraging grounds on the Great Barrier Reef. *Science of the Total Environment*, 657, 401–409. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.322>
- Giraudeau, M., Sepp, T., Ujvari, B., Ewald, P. W., & Thomas, F. (2018). Human activities might influence oncogenic processes in wild animal populations. In *Nature Ecology and Evolution* (Vol. 2, Issue 7, pp. 1065–1070). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0558-7>
- Guimarães, S. M., Gitirana, H. M., Wanderley, A. V., Monteiro-Neto, C., & Lobo-Hajdu, G. (2013). Evidence of regression of fibropapillomas in juvenile green turtles *Chelonia mydas* caught in Niterói, southeast Brazil. *Diseases of Aquatic Organisms*, 102(3), 243–247. <https://doi.org/10.3354/dao02542>
- Halpern, B. S., Frazier, M., Afflerbach, J., Lowndes, J. S., Micheli, F., O'Hara, C., Scarborough, C., & Selkoe, K. A. (2019). Recent pace of change in human impact on the world's ocean. *Scientific Reports*, 9(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47201-9>
- Herbst, L. H., & Klein, P. A. (1995). Green turtle fibropapillomatosis: Challenges to assessing the role of environmental cofactors. *Environmental Health Perspectives*, 103(SUPPL. 4), 27–30.
- Herbst, Lawrence H. (1994). Fibropapillomatosis of Marine Turtles. *Annual Review of Fish Diseases*, 4(6), 389–425. [https://doi.org/10.1016/0959-8030\(94\)90037-X](https://doi.org/10.1016/0959-8030(94)90037-X)
- Jackson, J. B. C., Kirby, M. X., Berger, W. H., Bjorndal, K. A., Botsford, L. W., Bourque, B. J., Bradbury, R. H., Cooke, R., Erlandson, J., Estes, J. A., Hughes, T. P., Kidwell, S., Lange, C. B., Lenihan, H. S., Pandolfi, J. M., Peterson, C. H., Steneck, R. S., Tegner, M. J., & Warner, R. R. (2001). Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. *Science*, 293(5530), 629–637. <https://doi.org/10.1126/science.1059199>
- Jones, K., Ariel, E., Burgess, G., & Read, M. (2016). A review of fibropapillomatosis in Green turtles (*Chelonia mydas*). *Veterinary Journal*, 212, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2015.10.041>
- Jones, K., Burgess, G., Budd, A. M., Huerlimann, R., Mashkour, N., & Ariel, E. (2020). Molecular evidence for horizontal transmission of chelonid alphaherpesvirus 5 at green turtle (*Chelonia mydas*) foraging grounds in Queensland, Australia. *PLoS ONE*, 15(1), 1–22. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227268>
- Komoroske, L. M., Lewison, R. L., Seminoff, J. A., Deheyn, D. D., & Dutton, P. H. (2011). Pollutants and the health of green sea turtles resident to an urbanized estuary in San Diego, CA. *Chemosphere*, 84(5), 544–552.
- Li, X., Zhou, Y., Zhao, M., & Zhao, X. (2020). A harmonized global nighttime light dataset 1992–2018. *Scientific data*, 7(1), 1–9.
- Lotze, H. K., Lenihan, H. S., Bourque, B. J., Bradbury, R. H., Cooke, R. G., Kay, M. C., Kidwell, S. M., Kirby, M. X., Peterson, C. H., & Jackson, J. B. C. (2006). Depletion

- degradation, and recovery potential of estuaries and coastal seas. *Science*, 312(5781), 1806–1809. <https://doi.org/10.1126/science.1128035>
- Lutz, P. L., Musick, J. A., & Wyneken, J. (Eds.). (2002). *The biology of sea turtles*, Volume II (Vol. 2). CRC press.
- Mascarenhas, R., & Iverson, P. J. (2008). Fibropapillomatosis in stranded green turtles (*Chelonia mydas*) in Paraíba State, Northeastern Brazil: evidence of a Brazilian epizootic. *Marine Turtle Newsletter*, 120, 3-6.
- McCauley, D. J., Pinsky, M. L., Palumbi, S. R., Estes, J. A., Joyce, F. H., & Warner, R. R. (2015). Marine defaunation: Animal loss in the global ocean. *Science*, 347(6219). <https://doi.org/10.1126/science.1255641>
- McGranahan, G., Balk, D., & Anderson, B. (2007). The rising tide: Assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and Urbanization*, 19(1), 17–37. <https://doi.org/10.1177/0956247807076960>
- Morley, N. J. (2010). Interactive effects of infectious diseases and pollution in aquatic molluscs. *Aquatic toxicology*, 96(1), 27-36
- Mora, C., Aburto-Oropeza, O., Ayala-Bocos, A., Ayotte, P. M., Banks, S., Bauman, A. G., Beger, M., Bessudo, S., Booth, D. J., Brokovich, E., Brooks, A., Chabanet, P., Cinner, J. E., Cortés, J., Cruz-Motta, J. J., Cupul-Magaña, A., DeMartini, E. E., Edgar, G. J., Feary, D. A., ... Zapata, F. A. (2011). Global human footprint on the linkage between biodiversity and ecosystem functioning in reef fishes. *PLoS Biology*, 9(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1000606>
- Patrício, Ana R., Diez, C. E., van Dam, R. P., & Godley, B. J. (2016). Novel insights into the dynamics of green turtle fibropapillomatosis. *Marine Ecology Progress Series*, 547, 247–255. <https://doi.org/10.3354/meps11644>
- Paulino, G. V. B., Félix, C. R., Silvan, C. G., Andersen, G. L., & Landell, M. F. (2020). Bacterial community and environmental factors associated to rivers runoff and their possible impacts on coral reef conservation. *Marine Pollution Bulletin*, 156(December 2019), 111233. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111233>
- Pires, N. L., Muniz, D. H. de F., Kisaka, T. B., Simplicio, N. de C. S., Bortoluzzi, L., Lima, J. E. F. W., & Oliveira-Filho, E. C. (2015). Impacts of the urbanization process on water quality of Brazilian Savanna rivers: The case of preto river in formosa, Goiás state, Brazil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(9), 10671–10686. <https://doi.org/10.3390/ijerph120910671>
- Poli, C., Lopez, LCS., Mesquita, D., Saska, C., & Mascarenhas, R. (2014). Patterns and inferred processes associated with sea turtle strandings in Paraíba State, Northeast Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 74(2), 283–289. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.13112>
- Ritchie, B. (2006). Chapter 24 - Virology, In: *Reptile Medicine and Surgery* (Second Edition). W.B. Saunders, Saint Louis, pp. 391-417
- Rossi, S., Sánchez-Sarmiento, A. M., Santos, R. G. dos, Zamana, R. R., Prioste, F. E. S., Gattamorta, M. A., Ochoa, P. F. C., Grisi-Filho, J. H. H., & Matushima, E. R. (2019). Monitoring green sea turtles in Brazilian feeding areas: Relating body condition index to fibropapillomatosis prevalence. *Journal of the Marine Biological*

Association of the United Kingdom, 99(8), 1879–1887.
<https://doi.org/10.1017/S0025315419000730>

- Sánchez-Sarmiento, A. M., Rossi, S., Vilca, F. Z., Vanstreels, R. E. T., Monteiro, S. H., Vale, L. A. S., ... & Matushima, E. R. (2017). Organochlorine pesticides in green sea turtles (*Chelonia mydas*) with and without fibropapillomatosis caught at three feeding areas off Brazil. *Marine Biological Association of the United Kingdom. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 97(1), 215.
- Santos, R. G., Martins, A. S., Torezani, E., Baptistotte, C., da Nóbrega Farias, J., Horta, P. A., Work, T. M., & Balazs, G. H. (2010). Relationship between fibropapillomatosis and environmental quality: A case study with *Chelonia mydas* off Brazil. *Diseases of Aquatic Organisms*, 89(1), 87–95. <https://doi.org/10.3354/dao02178>
- Seminoff, J. A. (2004). *Chelonia mydas*. IUCN 2010. IUCN Red List of Threatened Species. Version 2010.4.
- Siddig, A. A., Ellison, A. M., Ochs, A., Villar-Leeman, C., & Lau, M. K. (2016). How do ecologists select and use indicator species to monitor ecological change? Insights from 14 years of publication in Ecological Indicators. *Ecological Indicators*, 60, 223–230.
- Shi, K., Huang, C., Yu, B., Yin, B., Huang, Y., & Wu, J. (2014). Evaluation of NPP-VIIRS night-time light composite data for extracting built-up urban areas. *Remote Sensing Letters*, 5(4), 358–366. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.905728>
- Shimada, T., Limpus, C. J., Hamann, M., Bell, I., Esteban, N., Groom, R., & Hays, G. C. (2020). Fidelity to foraging sites after long migrations. *Journal of Animal Ecology*, 89(4), 1008–1016.
- Shaver, D. J., Walker, J. S., & Backof, T. F. (2019). Fibropapillomatosis prevalence and distribution in green turtles *Chelonia mydas* in Texas (USA). *Diseases of Aquatic Organisms*, 136(2), 175–182. <https://doi.org/10.3354/dao03403>
- Silva-Júnior, E. S. da, de Farias, D. S. D., Costa Bomfim, A. da, Boaviagem Freire, A. C. da, Revorêdo, R. Â., Rossi, S., Matushima, E. R., Hildebrand Grisi-Filho, J. H., de Lima Silva, F. J., & Gavilan, S. A. (2019). Stranded Marine Turtles in Northeastern Brazil: Incidence and Spatial-Temporal Distribution of Fibropapillomatosis. *Chelonian Conservation and Biology*, 18(2), 249–258. <https://doi.org/10.2744/CCB-1359.1>
- Smale, D. A., Wernberg, T., Oliver, E. C. J., Thomsen, M., Harvey, B. P., Straub, S. C., Burrows, M. T., Alexander, L. v., Benthuyssen, J. A., Donat, M. G., Feng, M., Hobday, A. J., Holbrook, N. J., Perkins-Kirkpatrick, S. E., Scannell, H. A., sen Gupta, A., Payne, B. L., & Moore, P. J. (2019). Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services. *Nature Climate Change*, 9(4), 306–312. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0412-1>
- Small, C., & Nicholls, R. J. (2003). A global analysis of human settlement in coastal zones. *Journal of Coastal Research*, 19(3), 584–599.
- Tagliolatto, A. B., Guimarães, S. M., Lobo-Hajdu, G., & Monteiro-Neto, C. (2016). Characterization of fibropapillomatosis in green turtles *Chelonia mydas* (Cheloniidae) captured in a foraging area in southeastern Brazil. *Diseases of Aquatic Organisms*, 121(3), 233–240. <https://doi.org/10.3354/dao03020>

- Todd, P. A., Heery, E. C., Loke, L. H. L., Thurstan, R. H., Kotze, D. J., & Swan, C. (2019). Towards an urban marine ecology: characterizing the drivers, patterns and processes of marine ecosystems in coastal cities. *Oikos*, 128(9), 1215–1242. <https://doi.org/10.1111/oik.05946>
- Torezani, E., Baptistotte, C., Mendes, S. L., & Barata, P. C. R. (2010). Juvenile green turtles (*Chelonia mydas*) in the effluent discharge channel of a steel plant, Espírito Santo, Brazil, 2000-2006. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 90(2), 233–246. <https://doi.org/10.1017/S0025315409990579>
- Van Houtan, K. S., Smith, C. M., Dailer, M. L., & Kawachi, M. (2014). Eutrophication and the dietary promotion of sea turtle tumors. *PeerJ*, 2, e602.
- Williams, E. H., Bunkley-Williams, L., Peters, E. C., Pinto-Rodriguez, B., Matos-Morales, R., Mignucci-Giannoni, A. A., Hall, K. v., Rueda-Almonacid, J. V., Sybesma, J., Calventi, I. B. de, & Boulon, R. H. (1994). An epizootic of cutaneous fibropapillomas in green turtles *Chelonia mydas* of the caribbean: Part of a panzootic? *Journal of Aquatic Animal Health*, 6(1), 70–78. [https://doi.org/10.1577/1548-8667\(1994\)006<0070:AEOCFI>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8667(1994)006<0070:AEOCFI>2.3.CO;2)
- Work, T. M., & Balazs, G. H. (1999). Relating tumor score to hematology in green turtles with fibropapillomatosis in Hawaii. *Journal of Wildlife Diseases*, 35(4), 804–807. <https://doi.org/10.7589/0090-3558-35.4.804>
- Yetsko, K., Farrell, J., Stammnitz, M., Whitmore, L., Whilde, J., Eastman, C., Ramia, D. R., Thomas, R., Krstic, A., Linser, P., Creer, S., Carvalho, G., Burkhalter, B., Murchison, E., Schnitzler, C., & Duffy, D. (2020). *Mutational, transcriptional and viral shedding dynamics of the marine turtle fibropapillomatosis tumor epizootic*. <https://doi.org/10.1101/2020.02.04.932632>

Material suplementar:

Tabela S1. Lista das localidades que tiveram monitoramento de *Chelonia mydas* (CM) e a avaliação quanto à fibropapilomatose. Alagoas (AL) teve monitoramento em período e localidades diferentes resultando em AL1 contida em Nord2 e AL2.

Região	Projetos de Monitoramento de Praias	Duração	Localidades	Total de km avaliado	Total de CM avaliadas
Nordeste – Setor 1 (Nord1)	Bacia Potiguar	2011-2016	Aquiraz – Ceará (CE) à Caiçara do Norte – Rio Grande do Norte (RN)	328.63	3102
Nordeste – Setor 2 (Nord2)	Bacia de Sergipe e Alagoas	2010-2016	Piaçabuçu – Alagoas1 (AL1*) à Sítio do Conde – Bahia (BA), exceto Barreira de Coqueiros – Sergipe (SE)	198.36	2644
Sudeste (Sud)	Bacia de Campos – Espírito Santo	2010-2016 (RJ) 2011-2016 (ES)	São Francisco de Itabapoana, Quissamã, Macaé, Cabo Frio e Armação dos Búzios – Rio de Janeiro (RJ) e de Conceição da Barra à Presidente Kennedy – Espírito Santo (ES)	569.24	6625
AL2	Alagoas	2018	Maragogi – Alagoas2 (AL2*) à Feliz Deserto – Alagoas2 (AL2*)	198.66	930
Total				1294.89	13301

Tabela S2. Teste t de *Student* entre as variáveis explicativas CCC = comprimento curvilíneo da carapaça de *Chelonia mydas* encontradas encahadas, SB = saneamento básico, NL = *night light* por região estudada. Sendo Nordeste – setor 1 abrangendo os estados do Ceará (CE) e Rio Grande do Norte (RN); Nordeste – setor 2 com Alagoas (AL1: 2010-2016), Sergipe (SE) e Bahia (BA); e do Sudeste: Espírito Santo (ES) e Rio de Janeiro (RJ).

	Nord1 x Nord2		Sud x Nord1		Nord2 x Sud	
	t	p	t	p	t	p
CCC	15.619	< 0.001	-40.465	< 0.001	24.813	< 0.001
NL	8.8847	< 0.001	73.411	< 0.001	-68.274	< 0.001
SB	-20.178	< 0.001	-36.14	< 0.001	-68.953	< 0.001

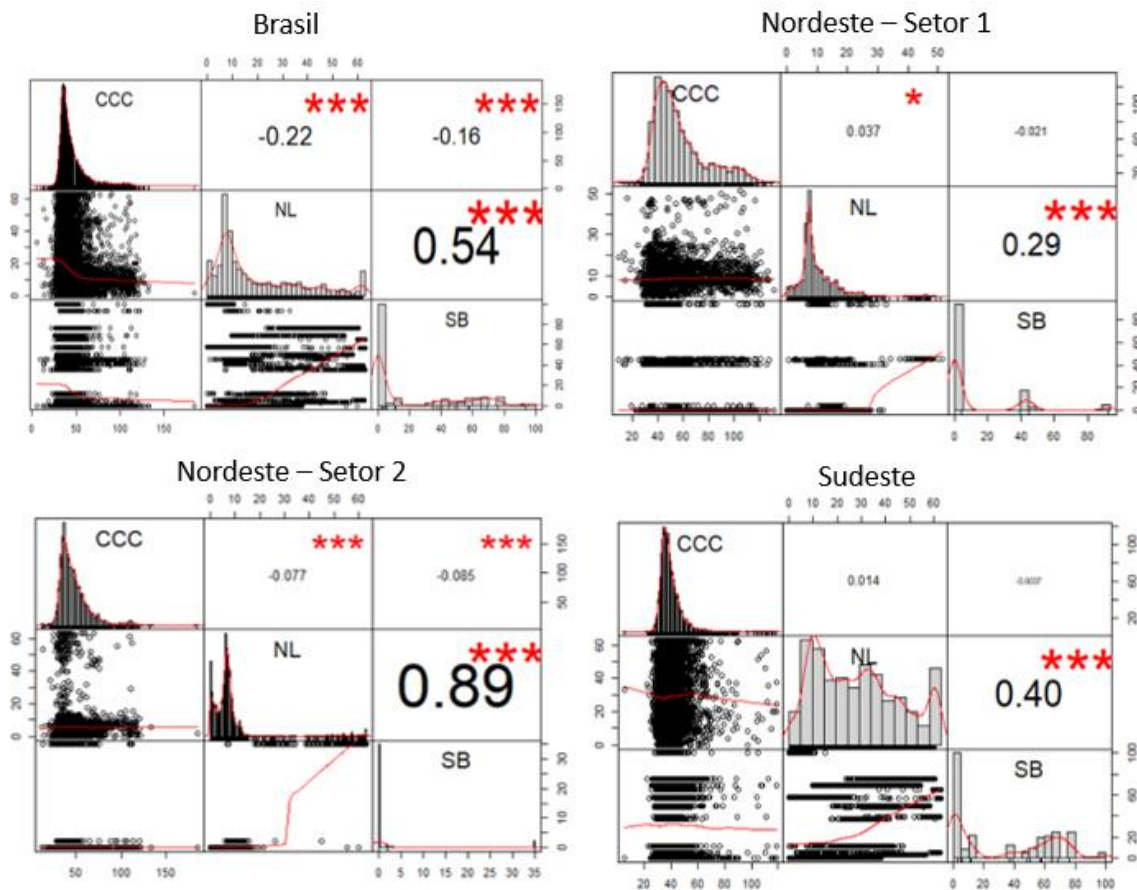


Figura S1. Valores de coeficiente de correlação entre as variáveis explicativas: CCC = comprimento curvilíneo da carapaça de *Chelonia mydas*, SB = saneamento básico, NL = *night light*, considerando dados completos (Brasil) e divididos por regiões (Nordeste – Setor 1 e 2 e Sudeste). Níveis de significância estão representados pelos asteriscos, sendo $p < 0.001$ ‘***’; $p < 0.01$ ‘**’; $p < 0.05$ ‘*’.

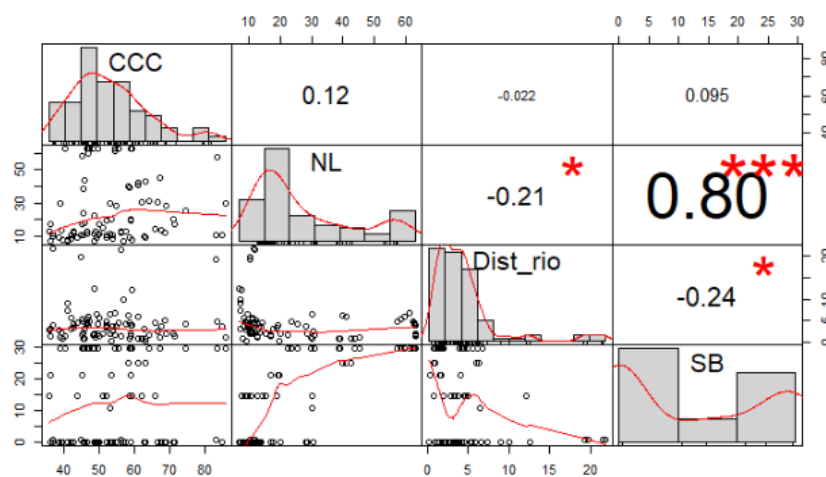


Figura S2. Valores de coeficiente de correlação entre as variáveis explicativas que podem influenciar a severidade de fibropapilomatose em *Chelonia mydas*, sendo CCC = comprimento curvilíneo da carapaça, SB = saneamento básico, NL = *night light*. Níveis de significância estão representados pelos asteriscos, sendo $p < 0.001$ ‘***’; $p < 0.01$ ‘**’; $p < 0.05$ ‘*’.

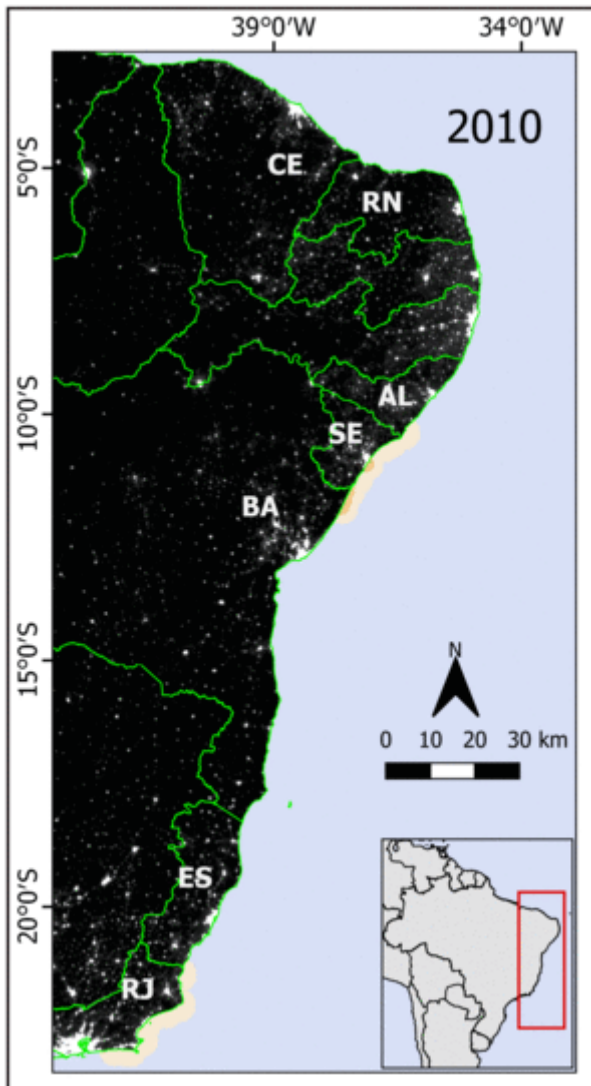


Figura S3. Prevalência da fibropapilomatose em *Chelonia mydas* com avaliações anuais, nas três regiões do Brasil avaliadas, com os dados de *night light* indicando urbanização referente a cada ano.

Tabela S3. Valores de prevalência (prev) de fibropapilomatose e total de indivíduos (n) de *Chelonia mydas* avaliados por estado, região e ano. Sendo: Nordeste – setor 1 (Nord1) abrangendo os estados do Ceará (CE) e Rio Grande do Norte (RN); Nordeste – setor 2 (Nord2) com Alagoas (AL1), Sergipe (SE) e Bahia (BA); do Sudeste: Espírito Santo (ES) e Rio de Janeiro (RJ).

	2010		2011		2012		2013		2014		2015		2016	
	prev	n	prev	n	prev	n	prev	n	prev	n	prev	n	prev	n
Nord1			8.4%	225	11.4%	465	17.5%	492	28.3%	612	33.3%	639	35.0%	669
CE			10.4%	115	10.5%	248	16.2%	265	33.6%	366	29.0%	317	25.2%	330
RN			6.4%	110	12.4%	217	18.9%	227	20.3%	246	37.6%	322	44.5%	339
Nord2	14.0%	436	25.0%	356	15.2%	519	20.2%	377	17.3%	342	17.0%	305	13.6%	309
AL1	10.4%	278	14.1%	156	15.5%	304	16.3%	184	10.2%	118	10.3%	117	9.6%	188
BA	28.7%	87	42.4%	132	12.7%	142	28.0%	125	22.1%	163	21.8%	147	22.7%	66
SE	9.9%	71	16.2%	68	19.2%	73	16.2%	68	18.0%	61	19.5%	41	16.4%	55
Sud	6.4%	157	19.4%	1236	25.4%	1859	35.0%	1458	35.8%	973	38.9%	262	41.3%	680
ES			19.0%	966	23.1%	1052	34.9%	853	38.1%	452	31.3%	134	41.5%	342
RJ	6.4%	157	20.7%	270	28.5%	807	35.0%	605	33.8%	521	46.9%	128	41.1%	338
BR	12.0%	593	19.2%	1817	21.3%	2843	28.9%	2327	30.1%	1927	30.4%	1206	33.6%	1658