

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
CAMPUS SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA E
MONITORAMENTO AMBIENTAL**

RAONE DOS REIS MARIANO

**“ASPECTOS ECOLÓGICOS E COMPORTAMENTAL DE VAGALUMES
Bicellonycha lividipennis MOTSCHULSKY, 1854 (COLEOPTERA: LAMPYRIDAE)
EM ÁREAS SOB INFLUÊNCIA DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL DE VAPOR DE
SÓDIO NO MUNICÍPIO DE SOROCABA-SP”**

Sorocaba

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
CAMPUS SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA E MONITORAMENTO
AMBIENTAL

RAONE DOS REIS MARIANO

“ASPECTOS ECOLÓGICOS E COMPORTAMENTAL DE VAGALUMES *Bicellonycha lividipennis* MOTSCHULSKY, 1854 (COLEOPTERA: LAMPYRIDAE) EM ÁREAS SOB INFLUÊNCIA DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL DE VAPOR DE SÓDIO NO MUNICÍPIO DE SOROCABA-SP”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia e Monitoramento Ambiental da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Biotecnologia e Monitoramento Ambiental.

Orientação: Prof. Dr. Vadim Viviani

Sorocaba

2022

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que me ajudaram: aos meus familiares, pelo apoio incondicional; aos meus colegas e amigos pelos momentos vividos; aos meus professores, que contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional, em especial ao amigo e professor Vadim Viviani, pela paciência e ensinamentos; além, é claro, de agradecer por todas as aventuras juntamente com meus colegas e amigos de laboratório, Daniel, Danilo, Gabriel e Vanessa, que participaram e vivenciaram momentos inesquecíveis comigo durante as expedições Brasil adentro. Sou grato também à minha namorada, Maria Eduarda, que me ajudou a “segurar a barra” nos momentos de tensão; a todos os funcionários da Universidade Federal de São Carlos - Campus Sorocaba, que proporcionaram a mim e a tantos outros alunos de graduação e Pós-graduação um ambiente tranquilo, amigável, limpo e com refeições generosas; à Secretaria de Pós-graduação em Biotecnologia e Monitoramento Ambiental e à CAPES, pelo apoio financeiro com as bolsas fornecidas durante a construção deste trabalho. Ao meu Pai, Mãe, irmãos, namorada, amigos e colegas, agradeço, e dedico este trabalho a vocês. Cada gota de suor derramada aqui tem a participação de todos. Obrigado!

RESUMO

As consequências da poluição luminosa se refletem entre vertebrados e invertebrados. Um dos organismos mais afetados pela poluição luminosa, mas que ainda são pouco estudados, são os vagalumes, em especial os lampirídeos. A bioluminescência desses coleópteros é fundamental para a comunicação intraespecífica durante sua reprodução, e o excesso de iluminação artificial pode interferir nesse processo. O presente trabalho analisou a ocorrência de vagalumes da espécie *Bicellonycha lividipennis* Motschulsky 1854, da família Lampyridae, em áreas palustres de Sorocaba-SP e região, afetadas ou não pela poluição luminosa. Diferentemente de outros vagalumes lampirídeos, os adultos dessa espécie persistem em áreas expostas a níveis de iluminação artificial relativamente elevados (0,8-8,6 Lux) de lâmpadas de alta pressão de vapor de sódio. A sobreposição espectral crepuscular no momento de sua atividade, em contraste com o pico de emissão do espectro de bioluminescência, pode explicar o menor efeito da iluminação da lâmpada de sódio sobre esse vaga-lume. Os resultados indicam que a iluminação artificial de vapor de sódio é menos impactante para os vaga-lumes ativos no crepúsculo. O início da atividade destes vagalumes durante o crepúsculo, quando ainda existem elevados níveis de iluminação natural, bem como a sobreposição parcial dos espectros de iluminação ambiental do crepúsculo e da iluminação artificial de sódio, explicam o menor efeito da iluminação deste tipo de lâmpada de sódio na atividade e ocorrência vaga-lume.

Palavras-chave: Poluição Luminosa. Vagalumes. Lampyridae. Bioluminescência. Impactos Ambientais.

ABSTRACT

The consequences of light pollution are reflected between vertebrates and invertebrates. One of the most affected organisms and target of study in this work are fireflies, especially lampyrids. The bioluminescence of these coleopterans is essential for carrying out their biological functions, mainly for inter and intraspecific communication. The present work verified the occurrence of *Bicellonycha lividipennis* Motschulsky, 1854 of the Lampyridae family, in swamp areas of Sorocaba-SP and region, with points affected or not by light pollution. Unlike other lampyrids, adults of this species persist in areas exposed to relatively high levels of artificial lighting (0.8-8.6 Lux) from a sodium vapor lamp. The twilight spectral overlap at the time of its activity, in contrast to the peak emission of the bioluminescence spectrum, may explain the smaller effect of sodium lamp lighting on this firefly. The results indicate that artificial lighting of Sodium vapor is less impactful to active fireflies at twilight. The beginning of these fireflies' activity during twilight, when there are still high levels of natural lighting, as well as the partial overlapping of the twilight ambient lighting spectra and artificial sodium lighting, explain the lower effect of lighting this type of sodium lamp. in firefly activity and occurrence.

Keywords: Light Pollution. Fireflies. Lampyridae. Bioluminescence. Environmental impacts.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Mapa global de poluição luminosa..... | 14 |
| Figura 2 – Equação geral das reações com luciferina, luciferase e intermediários..... | 16 |
| Figura 3 – Filogenia em diferentes táxons da evolução independente da bioluminescência..... | 17 |
| Figura 4 – Coleópteros bioluminescentes..... | 19 |
| Figura 5 – Os cupinzeiros luminosos do cerrado no Brasil central (MS, GO) (A-B) | 20 |
| Figura 6 – Larvas e fêmea de quatro espécies de fengodídeos..... | 21 |
| Figura 7 – Espectros correlacionados com grau de parentesco entre as espécies..... | 28 |
| Figura 8 – Ocorrência de coleópteros bioluminescentes sob intensidades luminosas..... | 31 |
| Figura 9 – Map-info dos municípios em que foram realizadas coletas e observações..... | 32 |
| Figura 10 – Imagem de satélite do <i>campus</i> UFSCar – Sorocaba e do local de coleta e observações..... | 33 |
| Figura 11 – Local de coleta e observação no Jardim América..... | 34 |
| Figura 12 – Parque do Campolim e ponto de coleta e observação na seta branca, mais baixo trecho da Rod. Raposo Tavares..... | 35 |
| Figura 13 – Ponto de observação no Rio Sorocaba, na marginal Dom Aguirre, ao lado do terminal São Paulo..... | 35 |
| Figura 14 – Ponto de observação no Condomínio Terras de São Francisco, Salto de Pirapora-SP..... | 36 |
| Figura 15 – Ponto de observação no Jardim Clarice em Votorantim-SP..... | 37 |
| Figura 16 – Ponto de coleta na Fazenda Ipanema - Flona (Floresta Nacional) de Iperó-SP..... | 38 |
| Figura 17 – Fêmea do vagalume <i>B. lividipennis</i> , imagem dorsal e ventral com destaque para as lanternas..... | 39 |
| Figura 18 – Larva de <i>B. lividipennis</i> , ilustração das ventosas e lanternas..... | 39 |
| Figura 19 – Espectro obtido <i>in vivo</i> da <i>B. lividipennis</i> | 44 |
| Figura 20 – Pontos de coleta e da presença de coleópteros bioluminescentes da Família dos Lampyridae no estado de São Paulo..... | 45 |

| | |
|--|----|
| Figura 21 – Pontos de coleta e da presença de coleópteros bioluminescentes da Família dos Lampyridae no estado de São Paulo..... | 46 |
| Figura 22 – Local de observação e habitat da <i>B. lividipennis</i> | 47 |
| Figura 23 – Temperatura média mensal (máx) registrada na região de Sorocaba-SP durante os anos 2017-2020..... | 49 |
| Figura 24 – Precipitação média mensal registrada na região de Sorocaba-SP durante os anos 2000-2020..... | 49 |
| Figura 25 – A - Decaimento da intensidade de luz ambiental e reflectância da vegetação - medidas realizadas na UFSCar, campus Sorocaba-SP..... | 51 |
| Figura 26 - Decaimento da luz ambiental medido em lux..... | 54 |
| Figura 27 – Espectros de bioluminescência do vagalume <i>Bicellonycha lividipennis</i> Motschulsky 1854, de iluminação ambiental natural e de iluminação artificial vinda dos holofotes de vapor de sódio..... | 56 |
| Figura 28 – A. Sobreposição do espectro de luz de sódio com o espectro de bioluminescência; B. Sobreposição do espectro de bioluminescência com a iluminância crepuscular..... | 58 |
| Figura 29 – Parque do Campolim após derramamento do agente poluente..... | 60 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----------|
| Tabela 1 – Espécies norte americanas e seus respectivos espectros..... | 22 |
| Tabela 2 – Espécies brasileiras e seus respectivos espectros..... | 25 |
| Tabela 3 – Sazonalidade da atividade de <i>Bicellonycha lividipennis</i>..... | 48 |
| Tabela 4 – Localidades, períodos de observação, dados de atividade da <i>B. lividipennis</i> em diferentes momentos..... | 52 |
| Tabela 5 – Dados recolhidos ao longo das últimas quatro décadas entre os anos de 1982 e 2015..... | 53 |
| Tabela 6 – Percentual da sobreposição espectral entre bioluminescência, iluminância ambiental no crepúsculo e lâmpada de sódio..... | 57 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | | | |
|--------|---|----------|-----------|
| UFSCar | Universidade Federal de São Carlos | | |
| CPTEC | Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climático | | |
| PL | Poluição Luminosa | | |
| PLE | Poluição | Luminosa | Ecológica |
| BL | Bioluminescência | | |

Vou “caçar” mais de 1 milhão, de vagalumes por aí...
-Pollo

Sumário

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 11 |
| 2 OBJETIVOS | 12 |
| 3 REVISÃO DA LITERATURA | 13 |
| 3.1 POLUIÇÃO LUMINOSA E SEUS EFEITOS EM INSETOS | 13 |
| 3.2 BIOLUMINESCÊNCIA | 15 |
| 3.2.1 Bioluminescência em insetos | 17 |
| 3.3 FUNÇÕES BIOLÓGICAS DA BIOLUMINESCÊNCIA EM COLEÓPTEROS | 19 |
| 3.3.1 Espectros de bioluminescência de Lampyridae | 21 |
| 3.3.2 Relação entre sensibilidade visual, espectros bioluminescência e atividade de vagalumes | 26 |
| 3.3.3 Impactos da poluição luminosa em vagalumes | 29 |
| 4 MATERIAIS E MÉTODOS | 29 |
| 4.1 LOCAIS DE ESTUDO | 29 |
| 4.1.1 314.1.2 324.1.3 334.1.4 344.1.5 354.1.6 364.1.7 374.2 IDENTIFICAÇÃO DE INSETOS | 38 |
| 4.2.1 394.3 TÉCNICAS DE COLETA DOS ESPÉCIMES | 40 |
| 4.3.1 404.4 COMPARAÇÃO DE OCORRÊNCIA DE POPULAÇÕES DE VAGALUMES EM LOCAIS ILUMINADOS E NÃO ILUMINADOS | 40 |
| 4.4.1 414.5 MEDIDAS DE INTENSIDADE LUMINOSA AMBIENTAL NATURAL E ARTIFICIAL | 41 |
| 4.6 ESPECTROS DE ILUMINAÇÃO AMBIENTAL | 42 |
| 4.7 ESPECTROS DE BIOLUMINESCÊNCIA | 42 |
| 4.8 MAPEAMENTO (GBIF)LEVANTAMENTO DE OCORRÊNCIA DE ESPÉCIES DA FAMÍLIA LAMPYRIDAE | 42 |
| 5 RESULTADOS | 44 |
| 5.1 DESCRIÇÃO DO SINAL BIOLUMINESCENTE DE <i>B. LIVIDIPENNIS</i> | 44 |
| 5.2 ASPECTOS ECOLÓGICOS DA <i>B. LIVIDIPENNIS</i> | 45 |
| 5.2.1 Sazonalidade de 475.2.2 Horário de atividade lampejante de adultos de 505.3 IOCORRÊNCIA E ATIVIDADE LAMPEJANTE DE <i>B. LIVIDIPENNIS</i> EM ÁREAS COM LUMINAÇÃO NATURAL E ARTIFICIAL | 50 |
| 5.3.1 Iluminância natural e da reflectância da vegetação durante a atividade de 505.3.2 Comparação da ocorrência de vagalumes em áreas iluminadas artificialmente e não-iluminadas | 51 |
| 5.3.3 Horário de atividade em áreas iluminadas artificialmente | 54 |
| 5.4 COMPOSIÇÃO ESPECTRAL DA ILUMINAÇÃO AMBIENTAL NATURAL E ARTIFICIAL | 55 |
| 6 DISCUSSÃO | 58 |
| 6.1 IMPACTO CAUSADO POR DERRAMAMENTO DE POLUENTES SOBRE POPULAÇÃO DE <i>B. LIVIDIPENNIS</i> NO PARQUE DO CAMPOLIM | 60 |
| 7 CONCLUSÕES | 61 |
| REFERÊNCIAS | 62 |

1 INTRODUÇÃO

A expansão das regiões metropolitanas, o aumento expressivo das cidades e consequentemente de pavimentações, estruturação de estradas e expansão dos limites urbanos, são processos decorrentes do crescimento exponencial da população humana (GARTNER, 2000). A migração da população de áreas rurais para os centros urbanos contribui para um crescimento desordenado (TUCCI, 2008), e para a superlotação das cidades, que leva à expansão dos limites urbanos e à constante busca por espaço (MARTINE, 2007), o que resulta em impactos ambientais.

O excesso de iluminação artificial, utilizada para suprir as necessidades dessa expansão desordenada dos limites urbanos, bem como seu mau direcionamento, têm como resultado a poluição luminosa (BARGHINI; MEDEIRO, 2006). É possível classificar a poluição luminosa em astronômica e ecológica (LONGCORE; RICH, 2004), sendo que esta última pode causar desequilíbrio ambiental e afetar populações de inúmeras espécies (RICH; LONGCORE, 2006), dentre elas os vagalumes (OWENS *et al.*, 2018; OWENS; LEWIS, 2021; VIVIANI *et al.*, 2010).

Algumas espécies de vagalumes da família Lampyridae possuem atividade crepuscular com diferentes adaptações ecológicas que viabilizam a comunicação e melhoram a percepção dos sinais luminescentes (HALL *et al.*, 2015). Toda a comunicação é realizada através de sinais luminosos (LEWIS; CRATSLEY, 2008; LLOYD, 1983), e a percepção desse sinal de bioluminescência depende do contraste entre o espectro de bioluminescência e o efeito fótico da vegetação (LALL *et al.*, 1980b). Há uma relação de adaptação entre o espectro de bioluminescência, a sensibilidade visual e o período de atividade em espécies de vagalumes norte-americanos (HALL *et al.*, 2015). Nas espécies norte-americanas, vagalumes com espectros deslocados mais para o amarelo (~560 nm) em geral possuem atividade crepuscular, enquanto as espécies com espectros na região do verde (~545nm) são preferencialmente noturnas (LALL, 1981; LALL *et al.*, 1980b; ENDLER, 1993; HALL *et al.*, 2015). Assim, estes organismos são vulneráveis aos impactos da poluição luminosa ecológica, que afeta negativamente sua comunicação por sinais bioluminescentes, interferindo no acasalamento e na reprodução dessas espécies (LEWIS, 2009; LONGCORE; RICH, 2004).

Provavelmente fatores que possam interferir na visibilidade dos sinais bioluminescentes, especialmente níveis mais elevados de poluição luminosa ecológica, afetam dramaticamente o comportamento dos vagalumes (OWENS *et al.*, 2018;

OWENS; LEWIS, 2021). Estudos relatam que populações de vaga-lumes diminuíram ou desapareceram ao longo do século passado em áreas urbanizadas e localidades próximas e ainda continuam sofrendo com as perturbações (VIVIANI *et al.*, 2010; OWENS; LEWIS, 2018). A poluição luminosa foi recentemente considerada uma das ameaças mais impactantes para vagalumes em todo o mundo (LEWIS *et al.*, 2020).

Trabalhos de levantamentos faunísticos investigaram aspectos biológicos e ecológicos de espécies de lampirídeos do bioma Mata Atlântica, no estado de São Paulo (SANTOS *et al.*, 2016; VIVIANI *et al.*, 2010, 2011). Ainda em 2010, Viviani e colaboradores relataram os potenciais impactos do desenvolvimento urbano sobre populações de coleópteros bioluminescentes. O desmatamento e a fragmentação das florestas, por exemplo, contribuem com esses efeitos negativos sobre as populações de vagalumes (MEDEIROS, 2016; OWENS; LEWIS, 2018). Os insetos de um modo geral vem sofrendo mudanças comportamentais drásticas, podendo ser considerados, em alguns casos bons indicadores biológicos, pois têm grande variedade de habitats e apresentam muitas espécies – desde as mais sensíveis às mais tolerantes (Thomanzini e Thomanzini 2002 apud SEIXAS; OLIVEIRA, V. C.; OLIVEIRA, A. M., 2012). Ao redor de cursos d'água (onde ocorreu parte das coletas e observações deste trabalho), de acordo com Vanotte *et al.* (1980 apud SEIXAS; OLIVEIRA, V. C.; OLIVEIRA, A. M., 2012), a vegetação marginal possui papel fundamental, pois fornece material como folhas e troncos que servem de abrigo ou fonte de alimento para muitos insetos. Sendo assim, a retirada desse e de outros tipos de vegetação para a prática de atividades como a mineração e a extração de madeira interferem diretamente na vida de insetos, entre os quais estão os vagalumes.

Em um estudo anterior realizado na região de Sorocaba-SP foi atestado que há de fato impactos da poluição luminosa sobre as populações de vagalumes, principalmente da espécie *Photinus* sp1 (HAGEN *et al.*, 2015). Entretanto uma espécie em particular, a *Bicellonycha lividipennis* Motschulsky 1854, tem se mostrado mais resiliente aos impactos ambientais oriundos da poluição luminosa. Conforme observações anteriores, o presente trabalho teve por objetivo investigar a ocorrência e aspectos ecológicos desta espécie em áreas iluminadas e sem iluminação artificial.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho consistiu em investigar a ocorrência e aspectos ecológicos de vagalumes da espécie palustre, *Bicellonycha lividipennis*, em áreas sob

influência de iluminação artificial com lâmpadas de vapor de sódio com áreas não-iluminadas na região de Sorocaba-SP, e para isso buscamos:

- Compreender o efeito da poluição luminosa na atividade e populações desta espécie de vagalume.
- Foram comparadas a presença e a atividade de adultos desta espécie ao longo de cursos d'água em áreas urbanas e rurais do município e região.
- Foram realizadas medidas das intensidades de luz artificial e bem como os espectros de iluminação ambiental nestes locais, medidos durante o início e final da atividade.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Poluição luminosa e seus efeitos em insetos

O termo “poluição luminosa” (PL) vem sendo frequentemente usado para descrever o excesso de iluminação artificial, que em grande parte é provocada pelo mau direcionamento e utilização incorreta de postes de iluminação com projetores que possuem estruturas inadequadas (GARGAGLIONI, 2009). Todo esse excesso de iluminação artificial já atinge mais de 19% da superfície terrestre e vem crescendo ano após ano (CINZANO *et al.*, 2001).

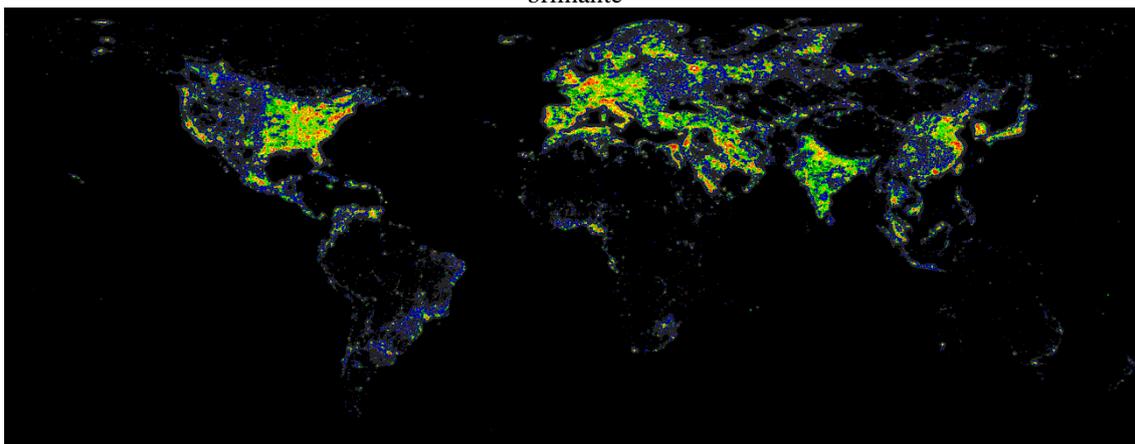
Recentemente, um levantamento sobre a incidência da PL em todo o planeta, destacou que mais de um terço da população mundial não conseguem mais avistar a Via Láctea da região onde moram, e no Brasil esse número é de cerca de 62% das pessoas, sendo que a metade desse percentual vive em grandes centros urbanos com altos níveis de intensidade luminosa (FALCHI *et al.*, 2016). A intensidade de luz artificial que atinge o céu pode provocar o fenômeno denominado de “Skyglow” ou “Brilho no céu”, que pode inibir a visualização de estrelas e corpos celestes (KYBA *et al.*, 2012).

Longcore e Rich (2004) esclarecem que tal acontecimento é decorrente da poluição luminosa astronômica, fenômeno recorrente em todo planeta (Figura 1) e que o termo ‘poluição luminosa’ por si só é muito amplo. Os impactos causados pela PL, vão desde os econômicos, como o desperdício de recursos em iluminação ineficiente (GARGAGLIONI, 2009), a perturbações que alteram padrões naturais de luz e escuridão em ecossistemas (RICH & LONGCORE, 2006). Com o avanço da PL, as consequências ecológicas e a compreensão desses danos são cada vez mais críticas, é sabido que as atividades biológicas são influenciadas pela PL (RICH E LONGCORE,

2006; GASTON *et al.*, 2014). Diversos insetos alados são atraídos pela iluminação artificial onde circundam os pontos de luz até exaustão. A fototaxia nesses organismos pode desencadear efeitos sobre as taxas demográficas, o que pode significar em impactos na abundância (FRANCK, 2006; PERKIN *et al.*, 2014). Longcore e Rich (2004) recorrem ao termo “poluição luminosa ecológica” (PLE) para descrever o fenômeno, que anteriormente fora estabelecido como ‘fotopoluição’ por Verheijen (1985), aqui segue-se o termo adotado por Longcore e Rich (2004).

A escuridão possui igual importância à luz do dia, é indispensável para um funcionamento saudável dos organismos e de todo o ecossistema, desta forma a PLE pode afetar fauna e flora, principalmente no relógio biológico ou ritmo circadiano das espécies, interferindo nas atividades biológicas e no comportamento dos indivíduos (DUNLAP, 1999). Tais comportamentos estão associados principalmente a comunicação, locomoção, migração, reprodução, além de à desorientação com a atração ou repulsão do ambiente iluminado, o que pode afetar também o forrageamento desses organismos (LONGCORE; RICH, 2004). A PLE também afeta os coleópteros, tornando-os presas fáceis para morcegos; em outros casos, ainda, faz com que eles colidam com a fonte luminosa e morram. (BARGHINI; MEDEIRO, 2006).

Figura 1 – Mapa global de poluição luminosa baseado em dados de satélite de 2016. As cores indicam a proporção do brilho artificial em relação ao brilho natural do céu: o amarelo representa 1-3 vezes mais brilhante, o laranja representa 3-9 vezes mais brilhante, e o vermelho representa 9-27 vezes mais brilhante



Fonte: David Lorenz¹.

Os coleópteros, de um modo geral, estão associados com importantes funções ecossistêmicas (DAVIS *et al.*, 2001; HERNÁNDEZ, 2003; NICHOLS *et al.*, 2007), tais atividades desempenhadas por esses organismos promovem desde a ciclagem de

¹ Disponível em: <http://djlorenz.github.io/astronomy/lp2016/>.

nutrientes no solo até a dispersão de sementes (NICHOLS *et al.*, 2008). Os serviços ecossistêmicos desempenhados pelos coleópteros estão ligados aos subconjuntos de funções ecológicas, sendo que esses aspectos são direta ou indiretamente benéficos para a condição humana (DE GROOT *et al.*, 2002).

Dentre os coleópteros afetados pela luz artificial estão os vagalumes, em especial os da família Lampyridae, que, de modo geral, fazem uso da bioluminescência com finalidade de comunicação intraespecífica, especialmente para fins de acasalamento, ou interespecífica como defesa e predação (LEWIS, 2009). Assim, a interferência da PLE pode ocasionar um desequilíbrio nessas populações, pois o ofuscamento interfere diretamente na comunicação visual dos vagalumes (HAGEN *et al.*, 2015).

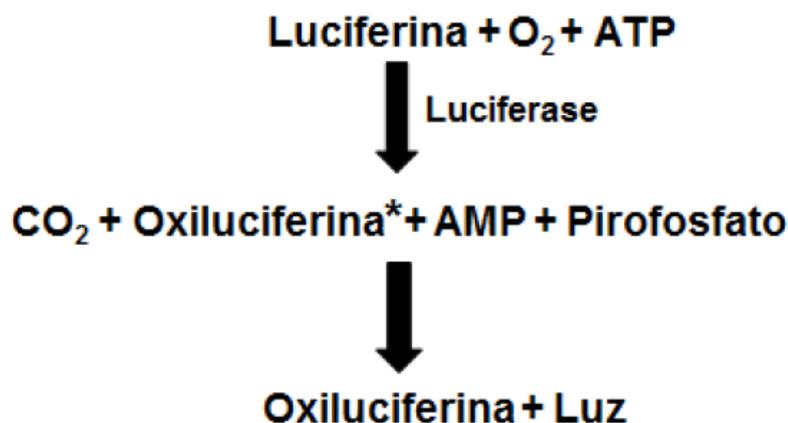
3.2 Bioluminescência

A bioluminescência tem fascinado os humanos há um longo tempo. Registros na China, datados de 1500-1000 a.C. no “Livro das Canções” (Shi Jing), onde é apresentado “i-yao hsiao-hsing”, traduzido como “Os vagalumes são intermitentemente brilhantes”, já retratavam tais organismos e suas atividades bioluminescentes (BECHARA; VIVIANI, 2015; HARVEY, 1957).

Harvey (1952) produziu o primeiro tratado sobre bioluminescência, descrevendo o que se conhecia até então sobre organismos que detinham esta capacidade. Esses organismos estão presentes em inúmeros grupos taxonômicos e nos mais distintos habitats, tendo sua maior distribuição nos oceanos (HADDOCK, 2010).

A bioluminescência é causada por reações bioquímicas em organismos vivos que resultam na emissão de luz fria na região visível do espectro (HASTINGS, 1983). Estas reações (figura 2) são ocasionadas pela oxidação de moléculas genericamente conhecidas como *luciferinas* por oxigênio molecular, na presença de enzimas conhecidas por *luciferases*, e eventualmente cofatores no caso dos vagalumes e seus parentes, a reação envolve ainda o ATP (adenosina trifosfato) e magnésio (BECHARA; VIVIANI, 2015; VIVIANI, 2002).

Figura 2 – Equação geral da reação luciferina-luciferase de besouros que gera a bioluminescência.



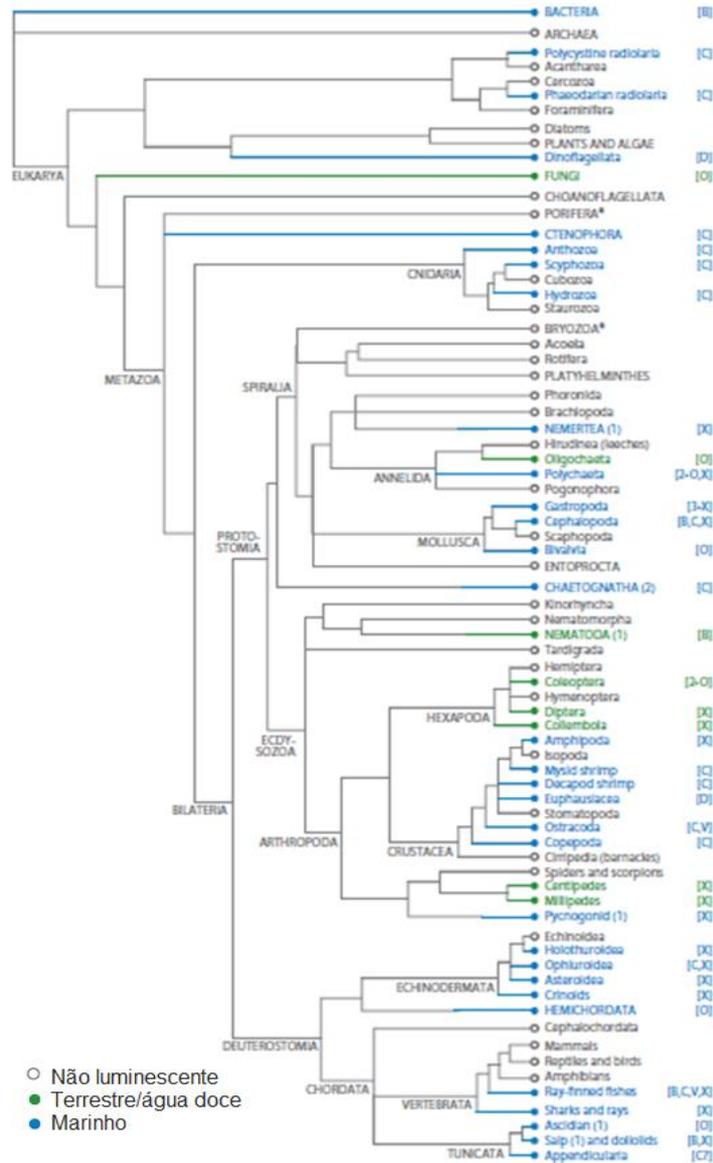
Fonte: Bechara & Viviani (2015). Imagem adaptada.

A maior parte dos organismos bioluminescentes foi encontrada no ambiente marinho em regiões abissais e em ambientes bentônicos rasos, como por exemplo peixes, bactérias, águas vivas, cnidários, entre outros (SHARIFIAN *et al.*, 2017). Apesar da complexidade evolutiva dessa característica, a origem da bioluminescência ocorreu de forma independente entre os mais diversos grupos taxonômicos, conforme atestado pela estrutura das lanternas bem como a natureza química das luciferinas e estrutura molecular das luciferases em diferentes grupos taxonômicos (HADDOCK, 2010), conforme a figura 3.

A evolução da bioluminescência, por exemplo, pode ter ocorrido apenas uma única vez para bactérias, porém a bioluminescência surgiu de forma autônoma inúmeras vezes para os celenterados e moluscos. A independência filogenética da bioluminescência talvez esteja associada à grande disponibilidade de luciferinas nesses organismos, indicando o quão importante é esse substrato em sua fisiologia (SHIMOMURA, 1987; HADDOCK, 2010). A vantagem seletiva proferida pela presença do substrato, que associada à presença da proteína catalisadora, pode conferir ao organismo características funcionais através da comunicação intra ou interespecíficas, pelos mais diversos ambientes, sejam eles em regiões abissais, na superfície dos oceanos, ou na terra (HADDOCK, 2010).

Figura 3 – Filogenia mostrando a evolução independente da bioluminescência em diferentes taxos. Azul – marinho, Verde - Terrestre /água doce e Cinza - filos não-luminescentes. Tipos de luciferina: [B]

Bacteria (+ simbionte), [C] Coelenterazina, [D] tetrapirrol de Dinoflagelados, [V] luciferina de Vargula (ostracod), [O] Outro (conhecido), [X] Outro (desconhecido).



Fonte: Haddock (2010).

3.2.1 Bioluminescência em insetos

A maior parte dos organismos terrestres que possuem bioluminescência encontra-se na classe Hexapoda, pertencendo às ordens Diptera, Collembola e principalmente Coleoptera (HERRING, 1978; VIVIANI, 2002; AMARAL *et al.*, 2014).

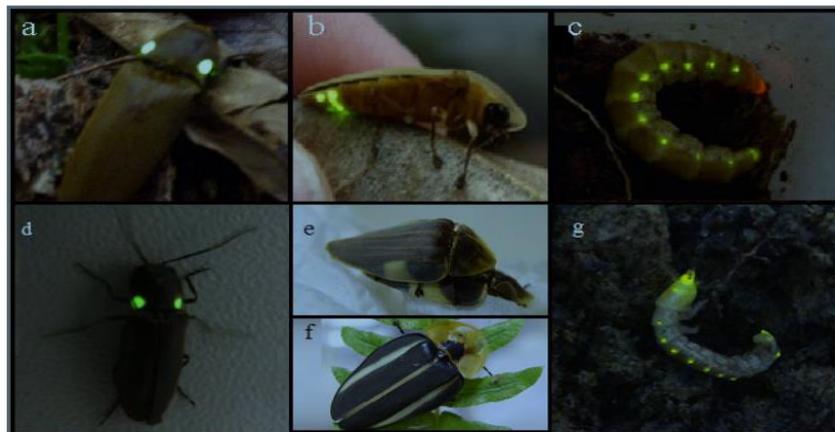
Os coleópteros, popularmente conhecidos como besouros, são organismos de desenvolvimento holometábolo, ou seja, possuem metamorfose completa, passando por ovo, larva, pupa e fase adulta. Nas espécies luminescentes, é possível observar a bioluminescência nos ovos e larvas, mas nem sempre nos adultos (BECHARA; VIVIANI, 2015). A bioluminescência entre os coleópteros é gerada em células

chamadas fotócitos, em órgãos luminescentes complexos, chamados fotóforos ou popularmente lanternas, com arranjos de traqueias e inervação bem desenvolvidos capazes de produzir flashes típicos, comumente observado em Lampyridae (BUCK, 1948; SELIGER *et al.*, 1964).

Os coleópteros bioluminescentes podem ser encontrados em quatro famílias: Phengodidae (larvas trenzinho), cujas larvas e fêmeas larviformes apresentam onze pares de lanternas pelos segmentos corporais, variando do verde ao alaranjado, e na tribo Mastinocerini, uma ou duas lanternas cefálicas que varia do verde ao vermelho conforme a espécie, os machos dessa família tem sua metamorfose completa se tornando alados na fase adulta (VIVIANI, 2002); Elateridae (tec-tec, pirilampos), com adultos que apresentam um par de lanternas no protórax e uma lanterna abdominal emitindo luminescência que varia do verde ao amarelo de acordo com a espécie (COSTA, 1988); Lampyridae (vagalumes), que emitem luz em geral na forma de lampejos que varia do verde ao amarelo através de lanterna na face ventral do abdômen; e Rhagophthalmidae, de ocorrência asiática (Paleártica), com lanternas pelos segmentos do corpo, as fêmeas são neotênicas e se parecem com larvas, habitando troncos e serapilheira, enquanto que os machos são alados, essa família é considerada grupo-irmão dos Phengodidae (VIVIANI, 2002; AMARAL *et al.*, 2014, 2016).

Na região Neotropical, é possível observar apenas espécies bioluminescentes pertencentes às famílias Elateridae, Lampyridae e Phengodidae (figura 4). O Brasil possui a maior diversidade de coleópteros bioluminescentes do mundo, com aproximadamente 500 espécies descritas, número que ultrapassa os 20% do total de espécies já descritas (COSTA, 2000). No entanto, Lloyd (2006) destaca a possibilidade de esse número ser ainda maior. Os coleópteros bioluminescentes podem ser encontrados por todo o território nacional, sendo agrupados na superfamília Elateroidea (VIVIANI *et al.*, 2010).

Figura 4 – Alguns coleópteros bioluminescentes: (a) *Pyrophorus divergens* (Elateridae), (b) *Cratomorphus altivolans* (Lampyridae), (c) *Phrixothrix hirtus* (Fengodidae), (d) *Pyrearinus sp* (Elateridae), (e) *Aspisoma lineatum* (Lampyridae), (f) *Cratomorphus distinctus* (Lampyridae) e (g) *Brasilocerus sp2* (Phengodidae). Fotos de V. Viviani.



Fonte: Adaptado de Amaral et al. (2014).

Os Diptera bioluminescentes são pertencentes à família Keroplatidae, que possui aproximadamente 1.000 espécies distribuídas em 92 gêneros (OLIVEIRA *et al.*, 2017), porém apenas os gêneros *Arachnocampa*, *Keroplatus*, *Neoceroplatus* e *Orfelia* são bioluminescentes (VIVIANI *et al.*, 2018; FALASCHI *et al.*, 2019).

Os Colêmbolos são minúsculos (cerca de 1 a 8mm) e estão presentes em diversos habitats. Mesmo sendo abundantes, são pouco conhecidos ainda (BELLINGER *et al.*, 1996). Geralmente são encontrados no solo junto a ambientes ricos em matéria orgânica em decomposição (BUZZI, 2002, TRIPLEHORN & JOHNSON, 2005).

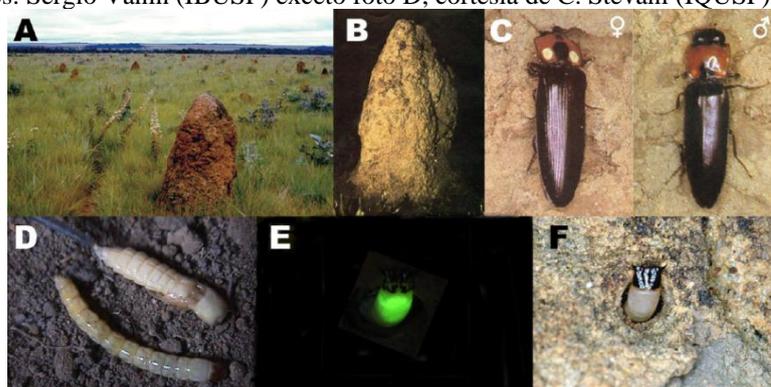
3.3 Funções biológicas da bioluminescência em coleópteros

Nos coleópteros, a luminescência apresenta função de comunicação intraespecífica, estando associada principalmente à atração sexual, e de comunicação interespecífica, associando-se à atração de presas ou defesa por aposematismo (BECHARA; VIVIANI, 2015). Grande parte das larvas de vagalumes emite luz mediante perturbação ou quando são manuseadas, indicando função de defesa (LEWIS, 2009).

A bioluminescência entre os lampírideos apresenta várias finalidades para o organismo (OHBA, 2004). O uso da bioluminescência em lampírideos adultos possui função intraespecífica para cortejo (LEWIS, 2009). Nos adultos, é possível observar padrões específicos de diferentes pulsos caracterizados pela frequência, quando machos correspondem a sinais luminosos emitidos pelas fêmeas (BUCK, 1990).

No Cerrado brasileiro, região de Costa Rica – GO, uma espécie de Elateridae, o *Pyrearinus termitilluminans* (figura 5), após o acasalamento, deposita seus ovos nas bases dos cupinzeiros. Ao eclodir dos ovos, as larvas escalam a estrutura de solo e cavam pequenos túneis no cupinzeiro, onde irão residir nos próximos meses até emergir na fase adulta (BECHARA; VIVIANI, 2015). As larvas emitem luz através de um órgão bioluminescente localizado no protórax, região posterior da cabeça (COSTA, 1982). As larvas projetam-se na superfície do cupinzeiro emitindo uma luz contínua para atrair suas presas (REDFORD, 1982).

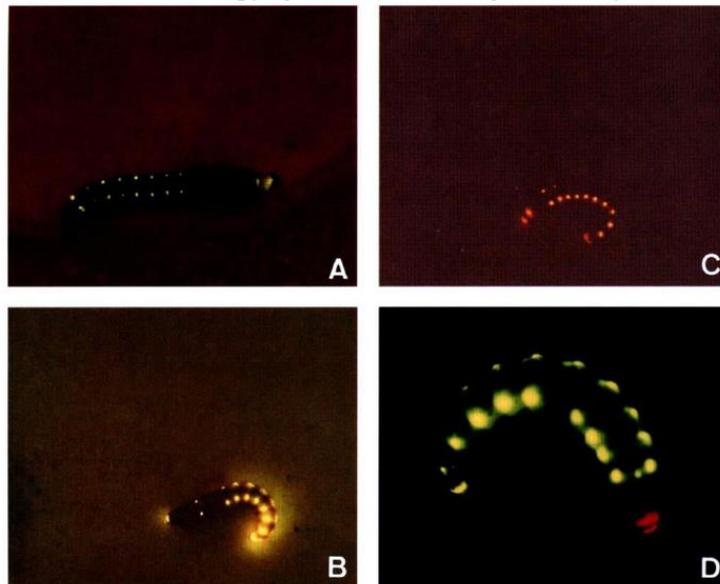
Figura 5 – Os cupinzeiros luminosos do cerrado no Brasil central (MS, GO) (A-B). Adultos, macho e fêmea (C), larva e pupa (D) do elaterídeo *Pyrearinus termitilluminans*. Larva expõe seu tórax brilhante em janelas de sua malha de túneis internos para atrair presas voadoras (cupins, formigas) e capturá-las (E-F). Fotos: Sérgio Vanin (IBUSP) exceto foto D, cortesia de C. Stevani (IQUSP).



Fonte: Bechara & Viviani (2015).

Os fengodídeos (figura 6) são representados no Brasil por 50 espécies classificadas em 8 gêneros. As larvas e fêmeas larviformes desses coleópteros bioluminescentes são popularmente conhecidas como “larva trenzinho”, devido ao número de lanternas pelo corpo, além de uma ou duas lanternas nas regiões cefálica e pós-cefálica (VIVIANI & BECHARA, 1997).

Figura 6 – Larvas e fêmeas de quatro espécies de fengodídeos com lanternas de diferentes cores: A, *Brasilocerus impressicolor*, larva; B, *Mastinomorphus* sp2, larva; C, *Mastinomorphus* sp1, fêmea; D, *Phrixothrix heydeni*, larva. 10 Copyright 1997 Entomological Society of America.



Fonte: Bechara & Viviani (2015).

Geralmente, as lanternas cefálicas se mantêm acesas, para servir de guia durante a caça às presas. As demais lanternas acendem quando se sentem ameaçadas - uma forma de evitar ser predado (VIVIANI & BECHARA, 1997).

3.3.1 Espectros de bioluminescência de Lampyridae

Na década de 60 alguns trabalhos realizados utilizaram espectrofluorímetros de gravação para registrar os diferentes espectros de vagalumes Jamaicanos e dos EUA. Para realizar as medidas houve uma padronização em relação à posição do órgão bioluminescente dos vagalumes, para evitar desvios pelas camadas celulares mais externas do órgão. O posicionamento então se deu com a fixação do órgão voltado para o captador, obedecendo a simetria elaborada (SELIGER *et al*, 1964). Seliger e colaboradores (1964) verificaram os espectros *in vivo* de dezesseis espécies de vagalumes jamaicanos e quatro espécies de vaga-lumes americanos. Para realizar as medições foi utilizada uma técnica simples de estimulação com acetato de etila para provocar uma emissão contínua brilhante durante um breve período de minutos. Os picos de emissão dos espectros variaram de 552 nm a 575 nm. Mais tarde Biggley e colaboradores (1967) utilizaram o mesmo método para avaliar a relação entre os espectros e a composição molecular presentes nos diferentes órgãos luminescentes de vagalumes. Com isso incluíram outras vinte espécies, entre americanas e jamaicanas,

com uma variação de espectros com picos de 549 nm a 575 nm. A partir da análise destes dados puderam deduzir que existem diferenças estruturais entre as moléculas da enzima "luciferase" que seriam responsáveis pelas diferentes cores de luz nos vaga-lumes.

Tabela 1 – Espécies norte americanas e picos de emissão de seus espectros de bioluminescência.

| Gênero/Espécie | $\lambda_{max}(nm)$ | Referência |
|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| <i>Diphotus sp.</i> | 555 | SELIGER <i>et al.</i> , 1964 |
| <i>Lecontea sp.</i> | 570 | SELIGER <i>et al.</i> , 1964 |
| <i>Photinus ceratus-morbosus</i> | 571 | SELIGER <i>et al.</i> , 1964 |
| <i>Photinus commissus</i> | 564 | SELIGER <i>et al.</i> , 1964 |
| <i>Photinus evanescens</i> | 570 | SELIGER <i>et al.</i> , 1964 |
| <i>Photinus gracilobus</i> | 572 | SELIGER <i>et al.</i> , 1964 |
| <i>Photinus leucopyge</i> | 569 | SELIGER <i>et al.</i> , 1964 |
| <i>Photinus lobatus</i> | 570 | SELIGER <i>et al.</i> , 1964 |
| <i>Photinus marginellus</i> | 565 | SELIGER <i>et al.</i> , 1964 |
| <i>Photinus melanurus</i> | 570 | SELIGER <i>et al.</i> , 1964 |
| <i>Photinus nothus</i> | 570 | SELIGER <i>et al.</i> , 1964 |
| <i>Photinus pallens</i> | 565 | SELIGER <i>et al.</i> , 1964 |
| <i>Photinus pardalis</i> | 560 | SELIGER <i>et al.</i> , 1964 |
| <i>Photinus pyralis</i> | 562 | SELIGER <i>et al.</i> , 1964 |
| <i>Photinus scintillans</i> | 575 | SELIGER <i>et al.</i> , 1964 |
| <i>Photinus sp. (nova espécie)</i> | 569 | SELIGER <i>et al.</i> , 1964 |

| | | |
|-------------------------------|-----|------------------------------|
| <i>Photinus xanthophotus</i> | 569 | SELIGER <i>et al.</i> , 1964 |
| <i>Photuris jamaicensis</i> | 555 | SELIGER <i>et al.</i> , 1964 |
| <i>Photuris pennsylvanica</i> | 552 | SELIGER <i>et al.</i> , 1964 |
| <i>Photinus ardens</i> | 566 | BIGGLEY <i>et al.</i> , 1967 |
| <i>Photinus collustrans</i> | 558 | BIGGLEY <i>et al.</i> , 1967 |
| <i>Photinus consanguineus</i> | 563 | BIGGLEY <i>et al.</i> , 1967 |
| <i>Photinus consimilis</i> | 562 | BIGGLEY <i>et al.</i> , 1967 |
| <i>Photinus floridanus</i> | 565 | BIGGLEY <i>et al.</i> , 1967 |
| <i>Photinus marginellus</i> | 565 | BIGGLEY <i>et al.</i> , 1967 |
| <i>Photinus sabulosus</i> | 566 | BIGGLEY <i>et al.</i> , 1967 |
| <i>Photinus tanytoxus</i> | 555 | BIGGLEY <i>et al.</i> , 1967 |
| <i>Photinus umbralus</i> | 562 | BIGGLEY <i>et al.</i> , 1967 |
| <i>Photuris sp.</i> | 549 | BIGGLEY <i>et al.</i> , 1967 |
| <i>Photuris sp.</i> | 552 | BIGGLEY <i>et al.</i> , 1967 |
| <i>Photuris sp.</i> | 553 | BIGGLEY <i>et al.</i> , 1967 |

Na Europa a biodiversidade de vagalumes é bem menor se comparada aos outros continentes, da mesma forma o número de estudos relacionados aos espectros desses coleópteros bioluminescentes também são menores (DE COCK, 2004; 2009). Algumas espécies de lampirídeos são amplamente estudadas, mas o *Lampyris noctiluca*, uma das primeiras espécies de lampirídeos descritas por Linnaeus, é sem dúvida a mais bem estudada (DE COCK, 2009). Em 2004 De Cock estudou as características espectrais de três espécies europeias de vaga-lumes, *Lampyris noctiluca*, *Phosphaenus hemipterus* e *Lamprohiza splendidula*. Foram realizadas medidas espectrais *in vivo* com o propósito

de comparar os espectros de bioluminescência entre as espécies. O espectro de emissão de *L. noctiluca* mostrou o pico na mesma faixa da bioluminescência larval entre ~546 e ~551 nm (DE COCK, 2004). A olho nu, as espécies *L. splendidula* e *L. noctiluca* possuem a mesma cor de bioluminescência (DE COCK, 2004) e Schwalb (1961) sugere que a emissão espectral dessas espécies seja idêntica, tanto para larvas quanto para adultos, e ambas as espécies estão dentro de uma faixa de ~550-580 nm.

Papi (1969) estudou o comportamento e a comunicação da espécie *Luciola lusitanica*, espécie essa tão estudada quanto *L. noctiluca* e *L. splendidula*. O espectro de bioluminescência desta espécie apresentou pico de emissão em 570 nm. De Cock (2009) destaca em seu trabalho que não encontrou nenhum estudo sobre o comportamento ou ecologia de *Luciola italica*, segundo Miksic (1982, p. 170) o mesmo ocorre com a espécie costeira endêmica de Montenegro *Luciola novaki* (apud DE COCK, 2009).

No Brasil, Viviani & Bechara (1995) registraram espectrofluorimetricamente o espectro *in vivo* de vinte e cinco espécies brasileiras distribuídas em nove gêneros (*Photinus*, *Photinoides*, *Macrolampis*, *Aspisoma*, *Cratormorphus*, *Amydetes*, *Photuris*, *Bicellonycha*, *Pyrogaster*). Diferente das espécies norte-americanas, que emitem em sua maioria luz predominantemente amarela, os espectros obtidos para as espécies brasileiras variaram na faixa do verde ao amarelo (548 nm a 573 nm), com maior frequência na região do verde. O contexto ecológico onde essas espécies estão adaptadas, sejam os habitats de campo aberto e florestas, além da duração do crepúsculo, podem ser possíveis fatores que explicariam tais diferenças (VIVIANI & BECHARA, 1995).

Viviani (2001) observou os padrões e cores de luminescência em espécies brasileiras adultas. Os espectros analisados mostram que em geral estes, e, portanto, as cores de bioluminescência, são conservadas entre as espécies do mesmo gênero, assim os espectros parecem ter um valor taxonômico (Tabela 2). Entre os exemplares observados nota-se que *Cratomorphus spp.* apresentou bioluminescência na região verde (550-553 nm), *Aspisoma spp.* no verde-amarelo (558-562 nm), *Photinus spp.* no amarelo (569-575 nm), *Amydetes spp.* no verde (548-550 nm), *Bicellonychia spp.* do verde ao verde-amarelo (557-562 nm) e *Pyrogaster spp.* no verde e verde-amarelo (557-558 nm). Boa parte das espécies observadas demonstraram atividade por um curto período durante o entardecer e poucas estavam ativas após o crepúsculo. Em alguns casos, espécies distintas ativas no mesmo horário, apresentaram espectros diferentes em habitats diferentes, por exemplo; a espécie ativa em florestas o *Photinus sp1* apresentou

espectro na região do amarelo (575 nm), a espécie de campo aberto o *A. lineatum* apresentou espectro na região do verde-amarelo (562 nm), e espécies com atividade em bordas de florestas como *A. physonotum* e *Pyrogaster sp1* apresentaram espectro na região do verde e verde-amarelo (557 nm) (VIVIANI, 2001).

Tabela 2 – Espécies brasileiras com os respectivos valores dos picos dos espectros de bioluminescência.

| Gênero/Espécie | $\lambda_{max}(nm)$ | Referência |
|--------------------------------|---------------------------------------|---|
| <i>Photinus sp1</i> | 563, 575 | Viviani & Bechara, 1995; Viviani, 2001; Viviani, Rocha & Hagen, 2010. |
| <i>Photinus jenai</i> | 567 | Viviani & Bechara, 1995; Viviani, Rocha & Hagen, 2010. |
| <i>Photinoides fuscus</i> | 569 | Viviani & Bechara, 1995; Viviani, 2001. |
| <i>Macrolampis omissa</i> | 572 | Viviani & Bechara, 1995 |
| <i>Macrolampis sp2</i> | 572 | Viviani & Bechara, 1995; Viviani, 2001. |
| <i>Aspisoma lineatum</i> | 563 | Viviani & Bechara, 1995; Viviani, 2001; Viviani, Rocha & Hagen, 2010. |
| <i>Aspisoma physonotum</i> | 561 | Viviani & Bechara, 1995; Viviani, 2001; Viviani, Rocha & Hagen, 2010. |
| <i>Aspisoma sp2</i> | 558 | Viviani & Bechara, 1995; Viviani, 2001; Viviani, Rocha & Hagen, 2010. |
| <i>Cratomorphus concolor</i> | 554 | Viviani & Bechara, 1995; Viviani, 2001; Viviani, Rocha & Hagen, 2010. |
| <i>Cratomorphus distinctus</i> | 554 | Viviani & Bechara, 1995; Viviani, 2001; Viviani, Rocha & Hagen, 2010. |
| <i>Cratomorphus sp3</i> | 551 | Viviani & Bechara, 1995; Viviani, Rocha & Hagen, 2010. |
| <i>Cratomorphus sp4</i> | 548 | Viviani & Bechara, 1995; Viviani, 2001. |
| <i>Cratomorphus gorhami</i> | 548 | Viviani, Rocha & Hagen, 2010. |
| <i>Amydetes sp1</i> | 548 | Viviani & Bechara, 1995; Viviani, 2001; Viviani, Rocha & Hagen, 2010. |
| <i>Amydetes sp3</i> | 551 | Viviani & Bechara, 1995; Viviani, 2001. |
| <i>Amydetes fanestratus</i> | 537 | Viviani, Rocha & Hagen, 2010. |
| <i>Photuris sp2</i> | 562 | Viviani & Bechara, 1995 |
| <i>Photuris sp3</i> | 563 | Viviani & Bechara, 1995 |
| <i>Photuris sp7</i> | 552 | Viviani & Bechara, 1995 |
| <i>Photuris sp8</i> | 558 | Viviani & Bechara, 1995 |

| | | |
|----------------------------------|-----|---|
| <i>Bicellonycha lividipennis</i> | 561 | Viviani & Bechara, 1995; Viviani, 2001; Viviani, Rocha & Hagen, 2010. |
| <i>Bicellonycha ornatcollis</i> | 562 | Viviani & Bechara, 1995; Viviani, 2001; Viviani, Rocha & Hagen, 2010. |
| <i>Bicellonycha sp6</i> | 551 | Viviani & Bechara, 1995 |
| <i>Bicellonycha sp8</i> | 555 | Viviani & Bechara, 1995; Viviani, 2001. |
| <i>Pyrogaster lunifer</i> | 553 | Viviani & Bechara, 1995 |
| <i>Pyrogaster moestus</i> | 557 | Viviani, Rocha & Hagen, 2010. |
| <i>Pyrogaster sp1</i> | 557 | Viviani & Bechara, 1995; Viviani, 2001. |
| <i>Pyrogaster sp2</i> | 559 | Viviani & Bechara, 1995; Viviani, 2001. |
| <i>Lucidota sp</i> | 550 | Viviani, 2001; Viviani, Rocha & Hagen, 2010. |
| <i>Lucidota discoidalis</i> | 550 | Viviani, Rocha & Hagen, 2010. |
| <i>Photuris sp. 7</i> | 552 | Viviani, Rocha & Hagen, 2010. |

Fonte: Adaptado

De um modo geral as espécies brasileiras apresentam bioluminescência mais deslocada para o verde-amarelo. Geralmente as espécies ativas no crepúsculo apresentam emissão de luz amarela, porém no Brasil espécies com luz verde também foram encontradas ativas durante o crepúsculo. Essas espécies brasileiras com atividades no mesmo horário e espectros diferentes parecem ter uma boa adaptação ao efeito fótico verde da vegetação durante crepúsculo (LALL *et al.*, 1980). Viviani & Bechara (1995) sugeriram que essa tendência para o verde no Brasil pode ser uma adaptação ao crepúsculo de duração mais curta nessas latitudes, e para o ambiente mais escuro de florestas tropicais no Sudeste brasileiro. Engler (1993), destaca que durante o crepúsculo o ambiente de luz em habitats distintos pode apresentar diferentes propriedades espectrais, assim esses ambientes podem conduzir à seleção dos espectros de bioluminescência, ou seja, uma otimização do sinal em relação ao ruído de fundo.

3.3.2 Relação entre sensibilidade visual, espectros bioluminescência e atividade de vagalumes

O espectro de iluminação ambiental, que inclui a iluminação que vem de diferentes ângulos do céu e a refletância da vegetação, pode influenciar no horário de atividade de muitos organismos (ENDLER, 1993), afetando a relação sinal/ruído visual (ENDLER, 1992). Para os vagalumes lampirídeos, a iluminação ambiental no período crepuscular (minutos após o pôr do sol) afeta a atividade para cada espécie (WING,

1984). Esses vagalumes fazem uso de sua bioluminescência principalmente para atrair companheiros, e seus sinais são diferenciados pela frequência de lampejos e pelos espectros de bioluminescência (LEWIS; CRATSLEY, 2008; LLOYD, 1983). O período após o pôr do sol, que determina o início da atividade de organismos crepusculares, pode ser medido através da unidade crepuscular (CREP unit), uma medida relacionada ao tempo após o pôr do sol, ou através da iluminância em LUX. A unidade CREP é dependente de algumas variáveis, como: horário de medida, horário de pôr do sol e tempo de duração do crepúsculo que varia com a latitude (NIELSEN, 1963; VIVIANI, 2001). A iluminância em LUX corresponde à quantidade de energia luminosa em uma superfície que recebe 1 lúmen por metro². Lúmen é uma expressão para a saída de energia luminosa, ou seja, é baseado no fluxo de radiação medida de acordo com o poder de produzir sensação visual (NIELSEN, 1963).

Lall e colaboradores (1980b) estudaram espécies vespertinas e noturnas da região Neártica e constataram uma predominância espectral da bioluminescência das espécies noturnas na região do verde, e das espécies crepusculares na região amarela, postulando que esta variação seria uma adaptação para contrastar melhor o sinal bioluminescente com o efeito fótico da refletância da vegetação (LALL *et al.*, 1980; HALL *et al.*, 2015).

A sensibilidade visual de vagalumes foi demonstrada com estudos eletroretinográficos, evidenciando a presença de diferentes receptores visuais associados com diferentes períodos de atividade para cada espécie (LALL *et al.*, 1980a; LALL, 1981). Os receptores deslocados para UV, com faixa espectral de 380 nm, e verde, com espectro próximo de 550 nm, foram observados na espécie noturna *Photuris versicolor* (LALL, 1981), enquanto a espécie crepuscular *Photinus pyralis* apresentou receptores deslocados para o violeta e verde-amarelo, com faixas espectrais de 400 e 570 nm, respectivamente (LALL *et al.*, 1980a).

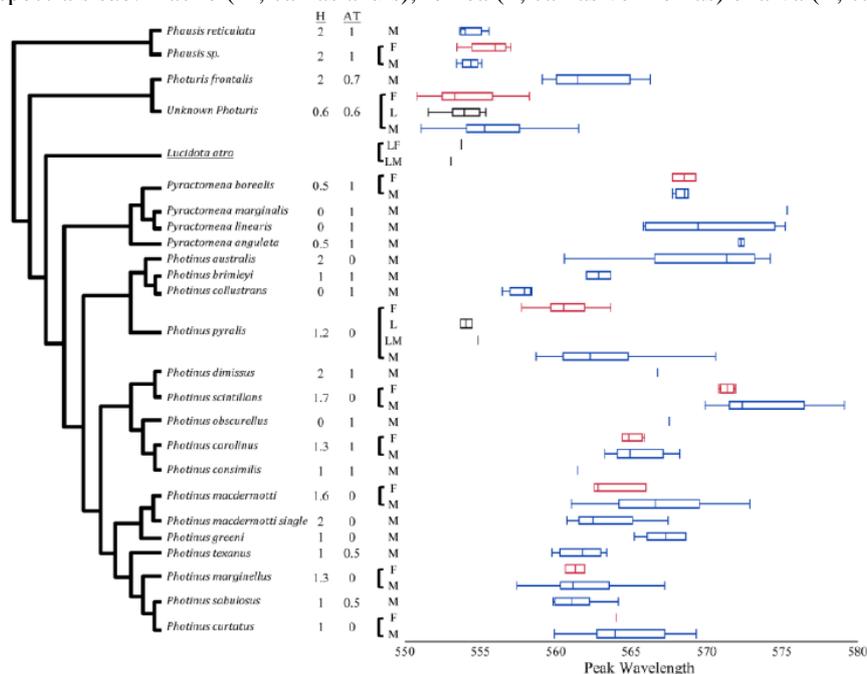
A característica de absorção dos fotopigmentos presentes nos olhos compostos está intimamente ligada à sensibilidade visual do organismo. Quando a sensibilidade visual estiver deslocada ao verde, indica a presença de um fotopigmento sensível nesta região espectral (LALL, 1982). Os pigmentos fotoestáveis disponíveis nos olhos dos vagalumes realizam uma filtragem dos comprimentos de onda da luz verde refletida na vegetação durante o crepúsculo, assim maximizam a detecção de sinais bioluminescentes na região do amarelo (LALL *et al.*, 1980b; LALL 1981). A percepção

do sinal é potencializada pela relação de contraste entre o espectro de bioluminescência e a vegetação (LALL *et al.*, 1980b).

Vagalumes com atividades mais tardias possuem, em geral, o espectro de bioluminescência mais deslocado ao verde (BIGGLEY *et al.*, 1967; SELIGER; MCELROY, 1964). Com a baixa intensidade de luz ambiental e a inexistência do ruído, as emissões de luz verde sobre a superfície da vegetação, são refletidas e podem ser mais bem detectadas (ENDLER, 1992). As fêmeas mais sedentárias usam as folhas verdes para amplificar seu sinal e aumentar sua visibilidade; este comportamento ficou conhecido como a ‘hipótese da refletância’ (HALL *et al.*, 2015).

O estudo conduzido por Hall e colaboradores (2015) relata evidências que destacam as emissões ainda mais verdes nas fêmeas de algumas espécies de vagalumes, que favorecem a percepção do sinal pelos machos. Os dados sugerem ainda que as forças de seleção, apoiadas na hipótese da refletância, podem estar associadas com o espectro mais verde das fêmeas (figura 7).

Figura 7 – Espectros de bioluminescência correlacionados com grau de parentesco entre as espécies. O habitat é representado como aberto (0), misto (1) ou fechado (2). O período de atividade foi dividido em ‘0’ e ‘1’ indicando o início de atividade crepuscular e noturno respectivamente. Os dados que apresentam as faixas espectrais são: macho (M, caixas azuis), fêmea (F, caixas vermelhas) e larva (L, caixas pretas)



Fonte: Hall et al. (2015). Imagem adaptada.

3.3.3 Impactos da poluição luminosa em vagalumes

A poluição luminosa está intimamente ligada aos avanços dos limites urbanos das cidades (OPERTI *et al.*, 2018), portanto, à medida que as cidades se expandem, também é esperado um aumento desse impacto (VAZ *et al.*, 2021), mesmo em localidades mais afastadas o excesso de luz pode ser visível (GUETTÉ *et al.*, 2018), podendo afetar paisagens noturnas muito além das áreas urbanas diretamente iluminadas (KYBA & HÖLKER 2013).

Vaga-lumes da família Lampyridae possuem ampla distribuição no globo, sendo a maior concentração de espécies na região neotropical. A diminuição deste grupo em função da expansão urbana já foi visualizada em diversos locais do mundo (LLOYD, 1993; DECOCK, 2004; LLOYD, 2006).

O declínio populacional dos vagalumes vem sendo estudado nos últimos anos e associado aos impactos antropológicos (LEWIS *et al.*, 2020), e principalmente aos desmatamentos que promovem perda de habitat (GARDINER & DIDHAM, 2020). Esse desmatamento juntamente com todo processo de urbanização impacta diretamente sobre as populações de vagalumes (GONÇALVES-SOUZA *et al.*, 2020). A poluição luminosa é um fator impactante adicional, que atinge direta e indiretamente as populações de vagalumes (LEWIS *et al.*, 2020). Constitui uma ameaça mais silenciosa e constante, que interfere, a nível individual, nas relações intra e interespecíficas, podendo trazer consequências imprevistas para as populações (VAZ *et al.*, 2021).

No município de Sorocaba-SP Hagen e colaboradores (2015) realizaram um estudo ao longo de 3 anos (2012-2015), antes e depois da instalação de holofotes de vapor multimetal no novo campus da Universidade Federal de São Carlos (Sorocaba, Brasil). O estudo indicou um declínio populacional de vagalumes ativos da espécie *Photinus sp1*. O efeito negativo da iluminação artificial levou a uma redução de 47 a 87% dos indivíduos ativos. Tal evidência ilustrou quantitativamente os efeitos nocivos da iluminação artificial e propõem os vaga-lumes como potenciais espécies bioindicadores para iluminação noturna (HAGEN *et al.*, 2015).

Em 2021 Vaz e colaboradores mostraram o quanto a poluição luminosa vem aumentando e pode comprometer significativamente o habitat em área de distribuição de *Amydetes fastigiata*, à medida em que a urbanização é ampliada (VAZ *et al.*, 2021).

Nos últimos dez anos os trabalhos e observações de campo vem relatando os efeitos da poluição luminosa ecológica sobre populações de vagalumes. Os

experimentos evidenciam consequências sobre a intensidade e duração do flash e sucesso de acasalamento em diferentes espécies de vaga-lumes (COSTIN & BOULTON, 2016; FIREBAUGH & HAYNES, 2016; OWENS *et al.*, 2018). Em 2012, Ineichen e Ruttimann (2012) relatam os impactos da iluminação artificial em populações Européias de *Lampyrus noctiluca*. Dois anos mais tarde Bird e Parker (2014) observaram que diferentes intensidades de poluição luminosa podem influenciar negativamente a localização e compromete o acasalamento entre indivíduos de *Lampyrus noctiluca*.

Em 2018 Owens e colaboradores chegaram à conclusão que a iluminação difusa de comprimentos de ondas longos (597 nm) representa menos impactos sobre comunicação de populações de vagalumes, o efeito da luz vermelha de fato se mostra menos contundente (OWENS *et al.*, 2022).

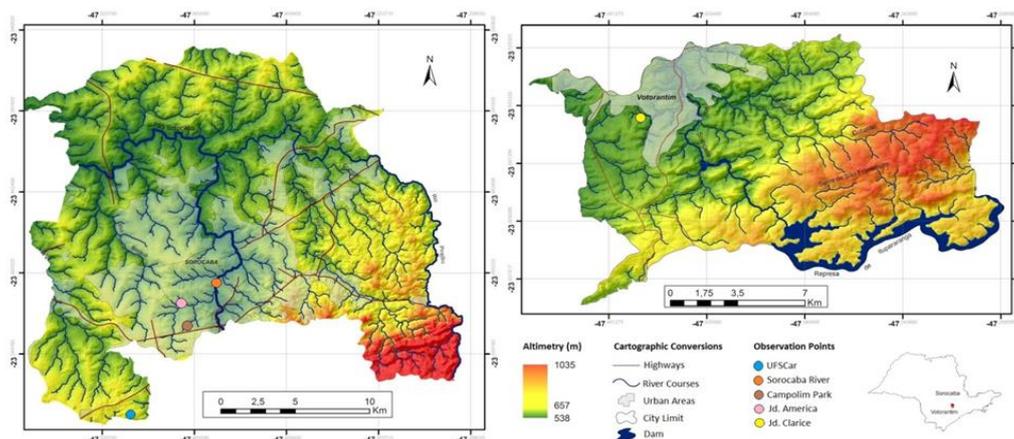
4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Locais de estudo

Parte dos locais para coletas e observações foi selecionada nos limites do município de Sorocaba-SP, região correspondente à Bacia do Alto Tietê, incorporando áreas palustres, com incidência ou não de iluminação artificial. O vagalume *B. lividipennis* possui seu nicho ecológico associado a ambientes palustres e abertos, o que justifica a seleção de áreas brejosas e locais de pastagem nas localidades selecionadas. Dentre os ambientes selecionados em Sorocaba estão: *Campus* da Universidade Federal de São Carlos (Sorocaba), Jardim América, Parque do Campolim e Rio Sorocaba, trecho da marginal Dom Aguirre próximo ao terminal São Paulo (mapas e detalhes das áreas nos itens abaixo).

Além dos pontos selecionados em Sorocaba-SP para amostragens, foram realizadas observações e coletas fora dos limites sorocabanos: no condomínio Terras de São Francisco, em Salto de Pirapora-SP; Jardim Clarice em Votorantim-SP; bairro Cururu em Cabreúva-SP, e Flona (Floresta Nacional), na Fazenda Ipanema, em Iperó-SP.

Figura 8 – Mapas hidrográficos dos municípios em que foram realizadas a maior parte das coletas e observações²



Fonte: Adaptado de Observatório do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Sorocaba e Médio Tietê.

4.1.1 UFSCar – campus Sorocaba-SP

O *campus* da UFSCar em Sorocaba-SP está situado numa área rural entre os municípios de Sorocaba-SP e Salto de Pirapora-SP, local correspondente às seguintes coordenadas: 23°35'1.58"S - 47°31'19.32"O. A área total do *campus* possui 700.000m², e o local onde foram realizadas as coletas e observações fica na divisa com outra propriedade, às margens do córrego Utinga. O local (Figura 10) é um típico pasto para pecuária com predominância de *Brachiaria spp.* como vegetação forrageira. O córrego represado está dominado por uma extensa faixa de *Typha spp.*, vulgarmente conhecida como “taboa”.

Figura 9 – Imagem de satélite do *campus* UFSCar – Sorocaba e do local de coleta e observações (seta branca)



Fonte: Google Maps

4.1.2 Jardim América

As coletas e observações realizadas no Jardim América ocorreram nas margens do Córrego Água Vermelha. No local, há atualmente uma pista de caminhada, construída após várias obras para formação de uma bacia de contenção. Anteriormente, havia uma predominância de *Brachiaria spp.* e *Typha spp.* no local e, com as obras de infraestrutura, houve uma perda de ecossistema. A área corresponde às coordenadas 23°30'59.62"S, 47°28'30.21"O e está inserida numa região bastante urbanizada e amplamente iluminada com lâmpadas de vapor de sódio, conforme a Figura 11.

Figura 10 – Local de coleta e observação no Jardim América. Nesta imagem atual é possível ver a pista de caminhada e uma nova reintegração ecossistêmica sendo formada na bacia de contenção

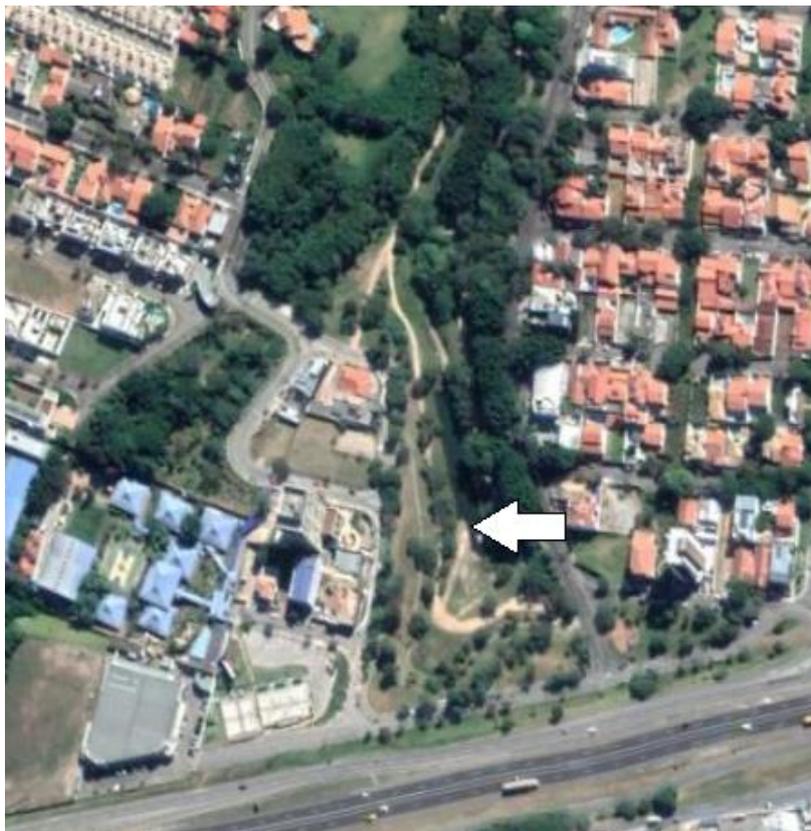


Fonte: Google Maps

4.1.3 Parque do Campolim

O Parque do Campolim está localizado na zona sul ($23^{\circ}31'44.4''\text{S}$, $47^{\circ}28'08.7''\text{O}$) de Sorocaba, às margens da Rodovia Raposo Tavares. No parque existem dois pequenos córregos que confluem, e duas lagoas e áreas bastante arborizadas e pontos brejosos, mas em apenas uma das lagoas foram encontrados espécimes de *B. lividipennis*. A lagoa encontra-se na parte mais alta do parque (Figura 11), muito próxima à rodovia e a prédios. Por ser um parque, a maior parte da vegetação forrageira é de grama esmeralda (*Zoysia japonica*) e árvores salgueiro-chorão (*Salix babylonica*). Todo o parque é iluminado, pois trata-se de uma área urbana aberta e destinada ao lazer, onde a iluminação torna-se inevitável e fundamental até mesmo para garantir comodidade e segurança aos usuários.

Figura 11 – Ponto de coleta e observação na seta branca, mais abaixo trecho da Rod. Raposo Tavares, no Parque do Campolim



Fonte: Google Maps

4.1.4 Rio Sorocaba – Marginal Dom Aguirre em dois pontos

O primeiro ponto de observação ao longo do Rio Sorocaba fica próximo à região central da cidade (figura 12), mais precisamente ao lado do terminal de ônibus São Paulo ($23^{\circ}30'20.3''S$, $47^{\circ}27'04.3''O$). No local há um pequeno trecho de mata ciliar, mas predominam nas margens assoreadas do rio a grama esmeralda (*Zoysia japonica*) e uma longa ciclovia que percorre as margens do rio. Assim como outros parques, o local é bastante iluminado por lâmpadas de vapor de sódio, porém o ponto exato onde ocorreram as observações fica mais “protegido”, tendo as árvores como filtro da interferência da iluminação artificial. O segundo ponto de observação (figura 14) fica próximo ao parque das águas ($23^{\circ}28'04.2''S$ $47^{\circ}26'28.5''O$), e assim como no primeiro local as características são bem similares. No local há um pequeno bosque e predominância de gramíneas. Em ambos os locais a *B. lividipennis* foi encontrada ao longo das margens do Rio Sorocaba.

Figura 12 – Na seta branca o ponto de observação no Rio Sorocaba na marginal Dom Aguirre, ao lado do terminal São Paulo



Fonte: Google Maps

Figura 13 – Na seta branca o segundo ponto de observação no Rio Sorocaba na marginal Dom Aguirre próximo ao parque das águas.



Fonte: Google Maps

4.1.5 Condomínio Terras de São Francisco, Salto de Pirapora-SP

O condomínio Terras de São Francisco está localizado no Município de Salto de Pirapora, no interior de São Paulo. O município fica a cerca de 20 quilômetros de

Sorocaba-SP, e o condomínio, na rodovia João Leme dos Santos, sentido Pilar do Sul-SP, nas seguintes coordenadas: 23°38'50.8"S, 47°35'24.9"O. No local existem dois lagos e ambos são iluminados; as ruas e casas ficam ao redor, o que faz incidir ainda mais luz artificial.

Figura 14 – Condomínio Terras de São Francisco, Salto de Pirapora-SP. Na seta branca o local onde ocorreram as observações.



Fonte: Google Maps.

4.1.6 Jardim Clarice, Votorantim-SP

Área palustre com predominância de pastagem para pecuária e pontos com *Typha spp.* e um pequeno fragmento de floresta, localizada sob as coordenadas 23°33'18"S 47°28'01"O, próximo ao Residencial Esplanada. A parte mais próxima do residencial sofre com a incidência de iluminação artificial de vapor de sódio, sendo que, em alguns pontos mais distantes, essa interferência é menor.

Figura 15 - Imagem de satélite do Jardim Clarice em Votorantim-SP. Na seta branca o local onde ocorreram as observações



Fonte: Google Maps.

4.1.7 Fazenda Ipanema - Flona, Iperó-SP

O ponto de coleta e observação fica próximo à represa, numa área com remanescentes de Mata Atlântica, mata ciliar e uma plantação de eucaliptos. Há também uma lagoa que fica próxima ao prédio da administração e um campo gramado ($23^{\circ}25'47.57''S$, $47^{\circ}35'54.26''O$). O local da amostragem, próximo ao lago é caracterizado como campo aberto com presença de gramíneas e arbustos. Próximo ao local, cerca de 150-200 metros, existem pontos de iluminação artificial de lâmpadas de sódio de alta pressão.

Figura 16 – Ponto de coleta na Fazenda Ipanema - Flona (Floresta Nacional) de Iperó-SP



4.2 Identificação de insetos

A identificação dos indivíduos *B. lividipennis* em campo ocorreu através do reconhecimento do sinal bioluminescente que consiste na emissão de lampejos simples consecutivos como critério de distinção entre diferentes espécies. Sinais repetidos do mesmo indivíduo não foram contabilizados, e indivíduos com sinais desconhecidos passaram a ser coletados para identificação por comparação direta com a coleção de Coleoptera da UFSCar.

Figura 17 - Fêmea do vagalume *B. lividipennis*, imagem dorsal e ventral com destaque para as lanternas.

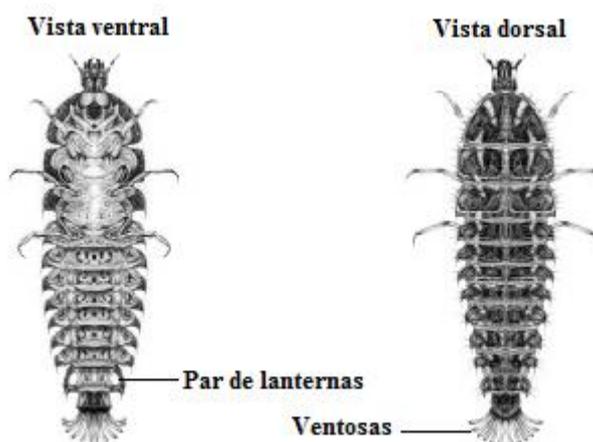


Fonte: Adaptada de MOREIRA *et al.*, (2022).

4.2.1 Larvas

As larvas do lampirídeo *B. lividipennis* foram coletadas no solo encharcado abaixo da vegetação à noite, mediante localização da luminescência relativamente contínua. O sinal bioluminescente das larvas é mais contínuo do que no adulto sendo que as lanternas se encontram ventralmente no 8º segmento abdominal (Figura 18). O material coletado foi levado ao laboratório em frascos plásticos contendo papel absorvente umedecido e acondicionado numa estufa. Os frascos foram mantidos dentro de uma estufa com temperatura de 23 °C e com fotoperíodo 16/8h. Com o objetivo de obter dados referentes ao ciclo de vida da espécie, as larvas foram criadas individualmente, permitindo a observação de eventos específicos como muda, pupação, e período de vida. A alimentação durante todo seu período larval ocorreu com caramujos, frequentemente encontrados em hortas e ambientes úmidos.

Figura 18: Larva de *B. lividipennis*, ilustração das ventosas e lanternas.



Fonte: Imagem adaptada, ilustração de Pedro Busana.

4.3 Técnicas de coleta dos espécimes

As coletas foram realizadas após o pôr do sol, entre os períodos crepuscular e noturno, em áreas palustres, durante os meses de agosto a maio de 2018 e 2020, conforme o calendário lunar. Foram contabilizados ao todo 82 dias de coletas, que representam mais de 200 horas de observações em campo durante o período acima citado. As observações foram realizadas simultaneamente com as coletas de espécimes para análises do espectro *in vivo*. Foram adotadas as seguintes técnicas foram utilizadas:

4.3.1 Coleta ativa

As coletas ativas consistem na proatividade do coletor, fazendo uso de ferramentas como puçá, ou manualmente, capturando os organismos que estiverem em voo ou pousados na vegetação. Assim, os lampirídeos adultos foram coletados no período de setembro a maio, após o pôr do sol, com a ajuda de rede entomológica, quando em voo, ou manualmente, quando pousados na vegetação. Geralmente as fêmeas são as que apresentam um padrão comportamental mais sedentário, emitindo sinais sobre a vegetação.

4.4 Comparação de ocorrência de populações de vagalumes em locais iluminados e não iluminados

O objetivo principal deste trabalho foi comparar a ocorrência e atividade lampejante de adultos desta espécie entre áreas pantanosas com características semelhantes, mas divergentes quanto à condição de iluminação artificial, a saber: (I) áreas sob iluminação artificial com lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão (áreas pantanosas em Jd. Clarice, Jd. América, Rio Sorocaba, Parque do Campolim e Terras de São Francisco, condomínio residencial em Salto de Pirapora-SP); e (II) áreas sem iluminação artificial direta (área pantanosa no Campus UFSCar Sorocaba e Fazenda Ipanema, Iperó-SP). Para tanto, estabeleceu-se a iluminação noturna ambiental como fator categórico com dois níveis: ambientes iluminados artificialmente e não-iluminados.

A observação de início e final da atividade dos indivíduos de *B. lividipennis*, foi realizada por meio da atividade lampejante de adultos machos em vôo percebida durante as noites de coleta, alternando os locais e dias, para reduzir o efeito das variações

climáticas. Para adotar esse método, faz-se necessário que o observador tenha experiência com a espécie em questão.

4.4.1 **Análise para presença ou ausência de populações ativas de *B. lividipennis***

Para analisar a presença de populações estabelecidas do vagalume *B. lividipennis*, considerou-se apenas áreas em que foram observados mais de 10 indivíduos ativos no período de 30 s durante noites consecutivas. As áreas com menos de 10 indivíduos não foram consideradas. Para isto foi estabelecido uma pré-contagem no início da atividade da espécie. Durante 30 segundos foram contabilizados os flashes dos indivíduos ativos, para essa observação se faz necessário um conhecimento prévio da espécie e do comportamento durante o período de atividade, desta forma não foi contabilizado flashes repetidos e nem de outras espécies. Para a contagem o observador permaneceu em um ponto fixo e foi estabelecido um transecto imaginário onde foram contabilizados os indivíduos ativos que estivessem dentro do campo de visão.

4.5 **Medidas de intensidade luminosa ambiental natural e artificial**

As medidas de intensidade de luz ambiental nos locais de coleta foram realizadas com auxílio de um fotômetro de campo Skye Instruments SKL 300, calibrado para sensor SKL-310 (SKYE INSTRUMENTS LDT, 2007), sendo quantificado em lux, numa faixa entre 0,010 e 200 lux. As medidas de luminosidade natural foram feitas durante o crepúsculo, o sensor foi posicionado a 45° em relação à tangente da Terra com a uma altura de 1,50 metros, após a estabilização da leitura determinou-se a intensidade de luz ambiental. Para as medidas de intensidade da luz artificial, o sensor foi direcionado para a fonte de emissão e, quando houve difusão de luz, o sensor foi direcionado para o lado que apresentava a fonte de iluminação. As medidas foram realizadas a cada 10 minutos e totalizaram entre 8 a 15 repetições por dia de observação.

Outro parâmetro adotado foi a intensidade da reflectância da vegetação durante o crepúsculo. Para realizar as medidas foi utilizado o fotômetro foi direcionado para vegetação a 60° de inclinação em relação à tangente da Terra durante o crepúsculo com a uma altura de 1,50 metros, após a estabilização da leitura determinou-se a intensidade de luz refletida pela vegetação.

4.6 Espectros de iluminação ambiental

Para medir os espectros de refletância da vegetação e iluminação ambiental, foi utilizado um espectrômetro de campo portátil *Ocean Optics QE65 Pro* (OCEANOPTICS, 2010), baseado em um detector CCD refrigerado de grande eficiência. Esse equipamento permite realizar medidas de espectro mesmo em baixo nível de luminosidade, devido à longa exposição do sensor, limitando assim distorções significativas do espectro. Os espectros foram tomados em diferentes ângulos: (1) com o sensor direcionado para a fonte de luz artificial; (2) voltado para o céu e para as fontes naturais de luz como a lua ou céu a oeste; (3) voltado para a vegetação em que ocorrem os vagalumes adultos.

Os espectros das foram varridos entre 200 e 1000 nm. Como o espectro de luz visível está na faixa de 400 nm a 700 nm, os espectros foram normalizados nessa faixa. O sensor foi direcionado em diferentes posições, para fonte de luz artificial e para o céu em sentido ao oeste durante o crepúsculo.

4.7 Espectros de bioluminescência

As medidas de espectro de bioluminescência *in vivo* foram realizadas com auxílio de um espectrômetro *LumiSpectra ATTO* (Japão), entre 400 e 700 nm. Para realizar a medida, foi necessário sedar o vagalume, colocando-o em um recipiente com papel embebido de clorofórmio (Viviani, 2001). Cada indivíduo ficou cerca de 30 segundos em contato com o anestésico. Em seguida, após a sedação, utilizando uma seringa tipo-insulina de 1 mL, e foram injetados aproximadamente 50 μ L de adrenalina no abdômen, debaixo da cutícula na região central da lanterna. Por fim, o vagalume foi fixado e geometricamente posicionado numa lâmina de vidro com a lanterna voltada para baixo em direção ao fotodetector. Os espectros foram varridos de 400 a 700 nm. Todo o procedimento foi realizado em temperatura ambiente de 22°, não passando de 2 minutos após a aplicação da adrenalina. A exposição de cada espécime foi de 3 segundos. As medidas foram realizadas em triplicata, com 3 medidas para no mínimo 3 indivíduos da mesma espécie. O erro padrão do desvio foi de ± 2.5 nm.

4.8 Mapeamento (Gbif) Levantamento de ocorrência de espécies da família

Lampyridae

Neste trabalho foi realizado também o levantamento de pontos de coletas de indivíduos pertencentes à família Lampyridae, principalmente da espécie *B.*

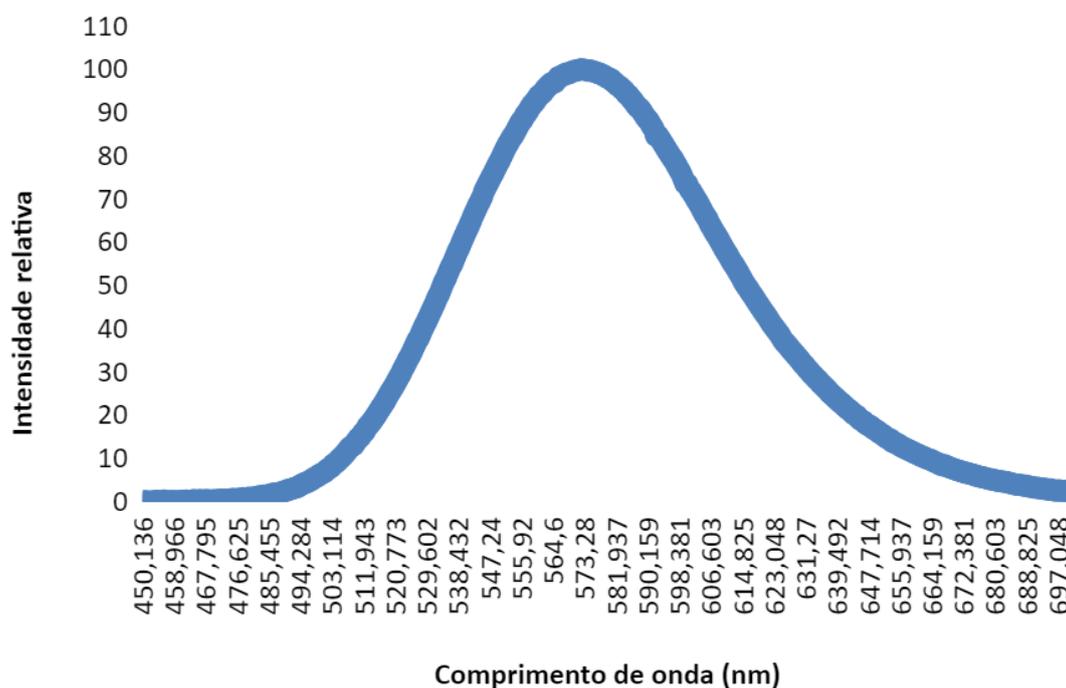
lividipennis. Para tal, foi utilizado o pacote *gbif* dentro do programa R (R core team, 2019). A busca foi realizada com a limitação de área, focando apenas em indivíduos presentes dentro do Estado de São Paulo. Também foram utilizados pontos de coleta de materiais depositados no Museu de Luminescência da UFSCar, o qual é curado pelo Prof. Dr. Vadim Viviani. Após a coleta desse conjunto de dados, foram aplicados filtros para remoção de pontos de ocorrência em oceanos e mares. Os pontos mantidos foram então exportados e referenciados em mapa do Estado de São Paulo.

5 RESULTADOS

5.1 Descrição do sinal bioluminescente de *B. lividipennis*

O sinal bioluminescente dos machos desta espécie é monomodulado, ou seja, emitem um lampejo simples em intervalos muito curtos entre um e outro. A fêmea que ficam estacionárias nas moitas, emitem um sinal mais prolongado em resposta aos machos que voam. A cor da bioluminescência é verde-amarelada com um espectro com pico em 562 nm (VIVIANI E BECHARA, 1995). Foram realizadas novamente medidas do espectro de bioluminescência *in vivo* com outro equipamento e obtivemos um valor de 561 nm, e meia-banda de 80 nm (figura 19). O espectro obtido, além de coincidir, como esperado com o espectro publicado anteriormente (VIVIANI & BECHARA, 1995; VIVIANI, 2001; VIVIANI, ROCHA & HAGEN, 2010), também tem pico e boa sobreposição com o espectro *in vitro* da reação da respectiva luciferase clonada com a luciferina.

Figura 19 – Espectro obtido *in vivo* da *B. lividipennis*.



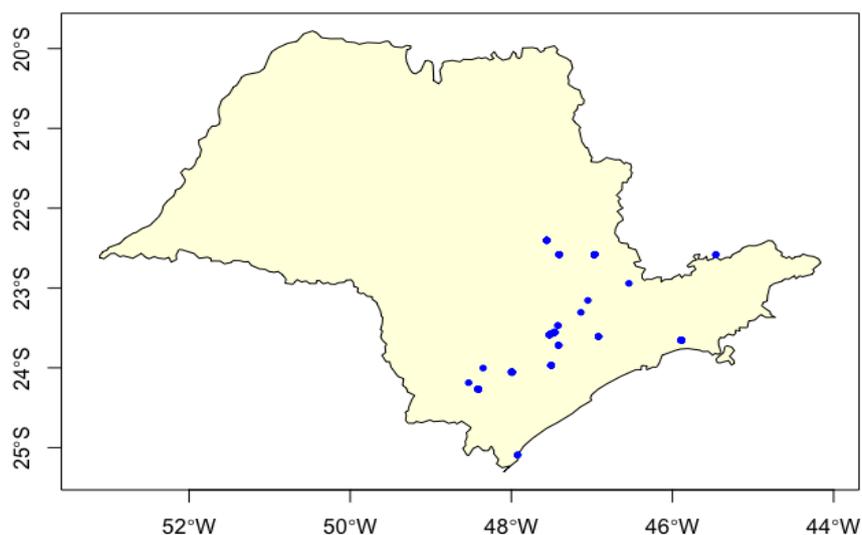
O tipo de comunicação por sinalização bioluminescente, corresponde ao sistema III reportado por Lewis (antigo sistema II de Lloyd, 1978), em que os machos voam e emitem um sinal primário ao qual as fêmeas estacionárias na vegetação respondem. Esta classificação é esperada para as espécies da subfamília Photurinae, e além disto é comprovada pelas observações de campo, além do fato dos machos apresentarem lanternas mais desenvolvidas do que as fêmeas.

5.2 Aspectos ecológicos da *B. lividipennis*

Distribuição geográfica

Durante a última década expedições foram realizadas pelo Brasil e principalmente no Estado de São Paulo, onde foram realizadas a maioria das coletas e observações da espécie a espécie *B. lividipennis*, que se mostrou abundante em diversas localidades no interior do estado de São Paulo e no Brasil nas figuras figura 20 e 21 respectivamente (Chapadão do Céu, Costa Rica-MS, Canguçu-TO; Xinguara-PA; Guaporé-RO); .

Figura 20 – Pontos de coleta e da presença de coleópteros bioluminescentes da Família dos Lampyridae no estado de São Paulo



Fonte: pacote *gbif* dentro do programa R (R core team, 2019).

Figura 21 – Biogeografia de *Bicellonycha lividipennis* no Brasil.



Habitat

O vaga-lume *Bicellonycha lividipennis* Motschulsky 1854 é uma espécie muito comum geralmente encontrada em campos pantanosos (VIVIANI, 2001). Este vagalume mostra-se relativamente comum em ambientes urbanizados, sendo frequentemente encontrado em diversas localidades do estado de São Paulo, inclusive em áreas com incidência de iluminação artificial (VIVIANI, ROCHA & HAGEN, 2010). Em ambientes sem interferência luminosa é possível encontrar essa espécie em áreas de pastagens e campos abertos, comumente nos arredores de lagos e riachos geralmente com cinturões de taboas (*Typha sp.*) e gramíneas como *Brachiaria sp.* (figura 22).

Figura 22 – Local de observação e habitat da *B. lividipennis*.



Fonte: Imagem adaptada de Viviani, Rocha & Hagen, 2010.

Geralmente, quando presente, a espécie é encontrada em grandes populações durante o período reprodutivo, em geral dezenas de indivíduos podem ser encontrados lampejando em áreas de 100-1000 m².

5.2.1 Sazonalidade de *B. lividipennis*

A sazonalidade aqui discutida corresponde ao período de atividade reprodutiva dos adultos, que foi acompanhada pela visualização dos lampejos. Grande parte das espécies de lampirídeos encontradas no estado de São Paulo e principalmente em Sorocaba e região possuem atividade entre os meses de outubro e março, a maioria com predominância entre outubro e fevereiro (VIVIANI, 2001; VIVIANI et al., 2010; SANTOS, 2013). Os dados analisados sobre a sazonalidade desses lampirídeos compreendem observações realizadas durante a última década em parte do estado (figura 19).

Na Tabela 3, é apresentado o conjunto de dados sobre as observações de sazonalidade do vagalume *B. lividipennis* e seus respectivos meses de atividade.

Tabela 3 – Sazonalidade da atividade de *B. lividipennis*

| Atividade de <i>Bicellonycha lividipennis</i> | | | | | | | | | | | | Referências |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------------------|
| Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez | |
| X | X | X | | | | | | | | X | X | Viviani (2001) |
| X | X | | | | | | | | X | X | X | Viviani et al. (2010) |
| X | X | X | | | | | | | X | X | X | Santos (2013) |
| X | X | X | X | X | | | | X | X | X | X | 2018, 2019 e 2020 |

No início dos anos 2000, esta espécie de vagalume foi encontrada em atividade durante período de cinco meses, de novembro a março (VIVIANI, 2001). Uma década mais tarde, observações realizadas por Viviani e colaboradores (2010) e Santos e colaboradores (2015) mostraram uma pequena extensão do período sazonal, entre os meses de outubro e março.

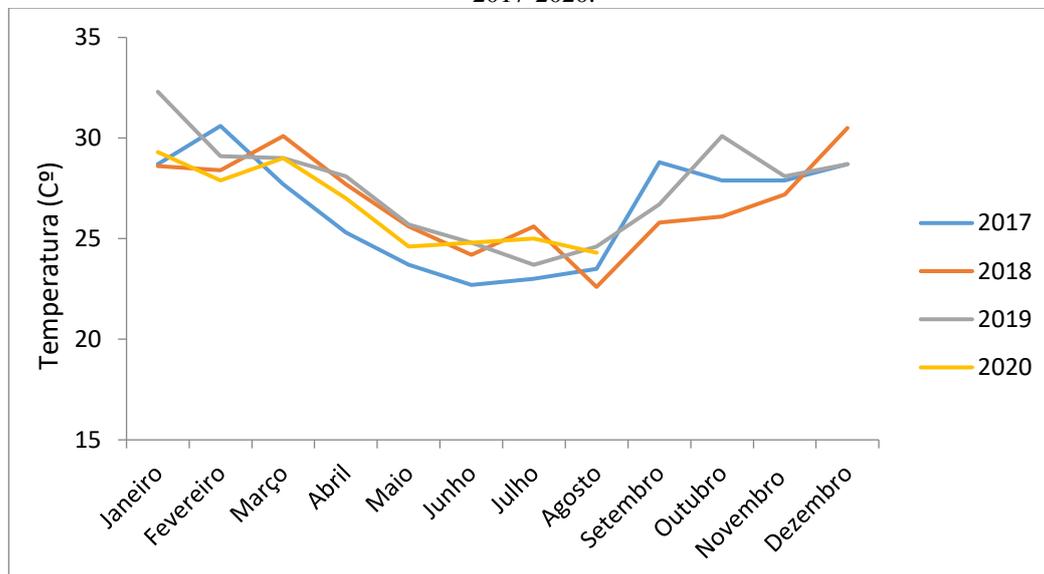
No entanto, entre 2018-2020, a atividade de *B. lividipennis* que observamos em áreas com iluminação, ocorreu até o mês de maio, diferentemente do que foi observado em áreas sem iluminação artificial, onde a atividade se estendeu até o mês de março.

Uma variação notável na sazonalidade desta espécie ocorreu em 2019, quando foram registradas temperaturas recorde em setembro (~40°C as 18:00h), em que observou-se pela primeira vez o início da atividade luminescente desta espécie partir desse mês no Parque do Campolim e ao longo do Rio Sorocaba na marginal Dom Aguirre (região central da cidade de Sorocaba).

A atividade dos vagalumes é influenciada pela temperatura, umidade e precipitação (VIVIANI, 2001). Com intuito de verificar se a temperatura e a precipitação pluviométrica possam ter influenciado na sazonalidade da *B. lividipennis*, foram analisados também os dados fornecidos pelo CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos), que apresentam um gradiente de alterações na temperatura e índice pluviométrico dos anos 2000 a 2020 (vide apêndice). Na figura 23 foram selecionados os últimos anos correspondentes ao período deste trabalho (2017-2020). Nota-se que o mês de setembro de 2019 apresentou de fato um pico com elevadas temperaturas, o que pode ter acelerado a emergência dos adultos, contudo, não é possível afirmar categoricamente que a temperatura possa ter afetado os padrões

comportamentais relacionados à sazonalidade da espécie, visto que os valores seguem uma tendência.

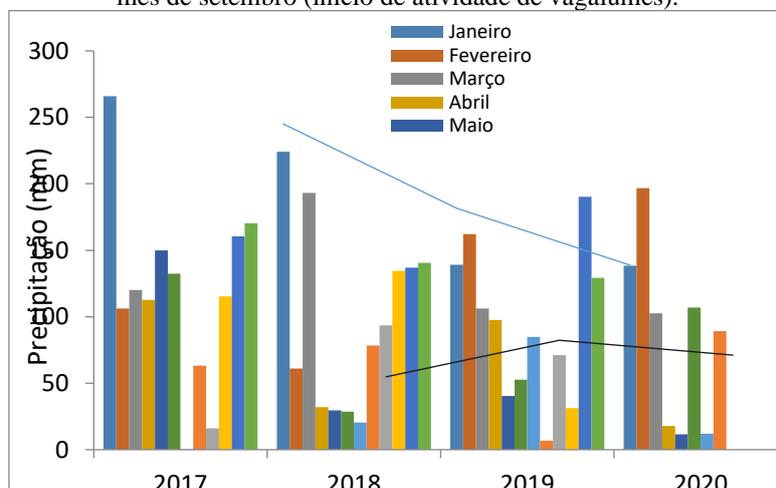
Figura 23 – Temperatura máxima média mensal registrada na região de Sorocaba-SP durante os anos 2017-2020.



Fonte: Conjunto de dados obtidos junto ao CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos).

É possível observar nos dados de precipitação fornecidos pelo CPTEC, uma queda na média móvel dos níveis de chuvas durante os três últimos anos (figura 24), esse período menos chuvoso pode ser explicado pelo fenômeno El Niño e La Niña, que se caracteriza por eventos que influenciam na variabilidade anual das chuvas (BODAS TERASSI *et al.*, 2018).

Figura 24 – Precipitação média mensal registrada na região de Sorocaba-SP durante os anos 2017-2020. Linha azul representa a média móvel do mês de janeiro (mais chuvoso) e linha preta média móvel para o mês de setembro (início de atividade de vagalumes).



Fonte: Conjunto de dados obtidos junto ao CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos).

5.2.2 Horário de atividade lampejante de adultos de *B.lividipennis*

O início de atividade lampejante dos vagalumes desta espécie em ambientes naturais sem interferência de iluminação artificial, definido como o horário que o primeiro vagalume lampejante é observado, ocorreu, em média, 10 minutos após o pôr do sol e o final de atividade observado foi entre 80 e 90 minutos após o início, quando não são mais observados vagalumes em vôo lampejando. Vale destacar que após 50 minutos do início da atividade, o número de indivíduos diminui visivelmente de forma significativa. Em alguns casos o período de atividade se encerrou em 60 minutos após o pôr-do-sol.

5.3 Ocorrência e atividade lampejante de *B.lividipennis* em áreas com iluminação natural e artificial

5.3.1 Iluminação natural durante a atividade

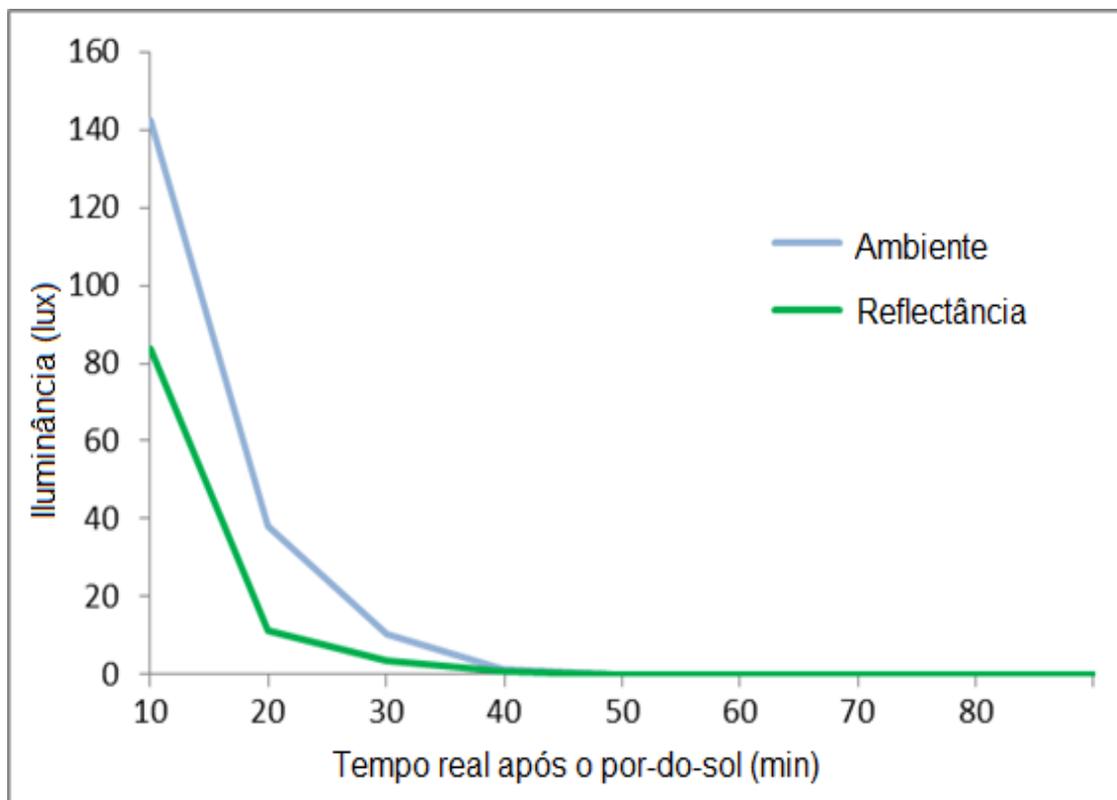
Espécies noturnas de vagalumes fazem uso da vegetação para ampliar a visibilidade do sinal bioluminescente através da reflectância da vegetação (ENDLER,1992). Geralmente são as fêmeas sedentárias que fazem uso das folhas verdes para amplificar seu sinal (HALL et al., 2015). No Brasil o período crepuscular é mais curto, fato esse decorrente da sua proximidade com a linha do Equador. É notável que algumas espécies mesmo com espectro de bioluminescência na região do verde iniciam sua atividade ainda no crepúsculo (VIVIANI & BECHARA, 1995).

Registramos a intensidade de luz oriunda do céu e da reflectância da vegetação (figura 25) durante a atividade de *B. lividipennis*. No início da atividade dos adultos desta espécie em ambientes naturais, a iluminância média vinda do céu registrada foi de 3.8 lux, enquanto no final da atividade após os 80 minutos a iluminância natural em noites de lua minguante e nova teve média de 0.03 lux. A intensidade de luz refletida pela vegetação variou de ~0.9 lux no início da atividade, até 0.07 Lux no final da atividade o que é uma faixa de intensidade de luz bem inferior à intensidade de luz que vem do céu que varia entre 3,8 e 8.5 lux durante o início da atividade crepuscular.

Comparativamente, as intensidades de luz que vem do céu em período de lua crescente e de lua cheia variam entre 0,03 e 0,3 lux, respectivamente (Ritch & Longcore, 2006). Entretanto, cabe salientar que estes valores de intensidade do luar são aqueles registrados no período que abrange os 80-90 minutos após o pôr-do-sol, quando já não existe mais influência da luz do crepúsculo, em que o período de atividade desta

espécie já se encerrou. Desta forma, o efeito fótico oriundo da lua crescente e cheia não devem afetar consideravelmente a atividade desta espécie vespertina.

Figura 25 – A - Decaimento da intensidade de luz ambiental e reflectância da vegetação - medidas realizadas na UFSCar, campus Sorocaba-SP.



Fonte: Dados do autor.

5.3.2 Comparação da ocorrência de vagalumes em áreas iluminadas artificialmente e não-iluminadas

Ao longo dos anos, comparamos a ocorrência desta espécie em áreas iluminadas e não-iluminadas na região de Sorocaba, e Campinas também. Dentre as áreas investigadas neste trabalho, duas delas (Faz. Ipanema e UFSCAR – Campus Sorocaba) estavam longe da iluminação artificial noturna direta, embora dentro do alcance da influência do fenômeno ‘skyglow’, quando iluminação oriunda da cidade é refletida pelas nuvens, que é magnificado em noites nubladas. As demais cinco localidades estavam sob influência direta da iluminação artificial de lâmpadas de vapor sódio. A intensidade luminosa nestas localidades artificialmente iluminadas no início de atividade de *B. lividipennis* variou entre 4,0 e 8,6 lux, dependendo da distância. Nas áreas iluminadas do Jardim Clarice e do Parque do Campolim, os níveis de iluminância

que incidia sobre a vegetação durante o início de atividade do vagalume variaram entre 6.8 e 8.6 lux, respectivamente (Tabela 4).

Tabela 4 - Localidades, períodos de observação, dados de atividade lampejante do vagalume *B. lividipennis* e de iluminação ambiental. As localidades foram classificadas em iluminadas ou não-iluminadas, contabilizado a iluminância em relação aos minutos após o pôr-do-sol (Min-APS) com valores de mínimo e máximo observados e desvio padrão(*).

| <u>Localidade</u> | <u>Período</u> <u>observações</u> | <u>Habitat</u> | <u>Início Atividade</u> | | <u>Final Atividade</u> | | <u>Número de</u> <u>observações</u> <u>(dias)</u> |
|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|---|----------------------------|---|---|
| | | | <u>Min - APS</u> | <u>Iluminân</u> <u>cia</u> <u>(LUX)</u> | <u>Min -</u> <u>APS</u> | <u>Iluminân</u> <u>cia</u> <u>(LUX)</u> | |
| UFSCar Campus Sorocaba – SP | Dez-12/ Fev-20 | Campo aberto s/ ilum. Art. | 13 - 21 *6,75 | 1.3 - 3.35 | 56 - 77 *10,85 | 0.002 - 0.09 | 27 |
| Jd. America Sorocaba – SP | Jan-12/ Jan-20 | Parque urbano | 23 - 26 *1,04 | 1.8 - 4.5 | 80 - 87 *2,48 | 0.04 - 1.2 | 6 |
| Rio Sorocaba TSP | Dez-17/ Abr-20 | Parque urbano | 19 - 22 *1,11 | 1.6 - 4.7 | 88 - 145 *15,89 | 0.05 - 0.08 | 7 |
| Fazenda Ipanema, (Flona) Iperó-SP | Jan-13 | Campo aberto s/ ilum. Art. | 10 - 18 | 1.7 - 3.1 | 80 - 85 | 0.01 - 0.04 | 2 |
| Parque do Campolim | Dez-17/ Mai-20 | Parque urbano | 16 - 37 *7,19 | 3.8 - 8.6 | 90 - 170 *21,63 | 0.48 - 0.55 | 22 |
| TSF - Salto de Pirapora – SP | Mar-18 | Parque urbano | 18 - 33 *5,70 | 2.4 - 5 | 120 - 180 *20,72 | 0.08 - 0.15 | 8 |
| Jd. Clarice Votorantim – SP | Jan-12/ Fev-13 | Local urbano c/ ilum. Art. | 15 - 27 *4,60 | 3.4 - 6.8 | 92 - 140 *16,83 | 0.06 - 0.8 | 10 |

Fonte: Dados comparativos fornecidos por Santos (2013) e pelo Prof^o Dr. Vadim Viviani.

O desvio padrão encontrado para os minutos do início da atividade nos ambientes com iluminação artificial apresentaram uma maior discrepância enquanto o valor apresentado no Campus apresentou um desvio padrão mais homogêneo, ou seja, mais próximo do zero que os demais locais no final de atividade. O início de atividade registrado no Rio Sorocaba e Jd. America tiveram números de observações parecidos e apresentaram valores aproximados e mais homogêneos.

Observações complementares. Nas últimas quatro décadas o Professor Dr Vadim Viviani vem acompanhando com observações no interior paulista, região de Campinas, os impactos oriundos da ação antrópica, mais precisamente ao efeito da iluminação artificial sobre populações de vagalumes. Nessas observações complementares (tabela 5) a iluminação artificial era oriunda de outros modelos de lâmpadas, entre elas a de vapor de mercúrio e incandescente. A intensidade de luz ambiental foi anotada em Lux logo no início da atividade foi possível registrar valores entre 1,6 e 4,5 Lux. O pesquisador observou também que numa área de pasto na Faz. Santana, onde havia ampla população desta espécie, após a instalação de bulbo de vapor de mercúrio em casa na frente do pasto, a área diretamente afetada pelo feixe de luz tinha menos vagalumes lampejando do que as áreas situadas na penumbra.

Tabela 5: Dados recolhidos ao longo das últimas quatro décadas entre os anos de 1982 e 2015.

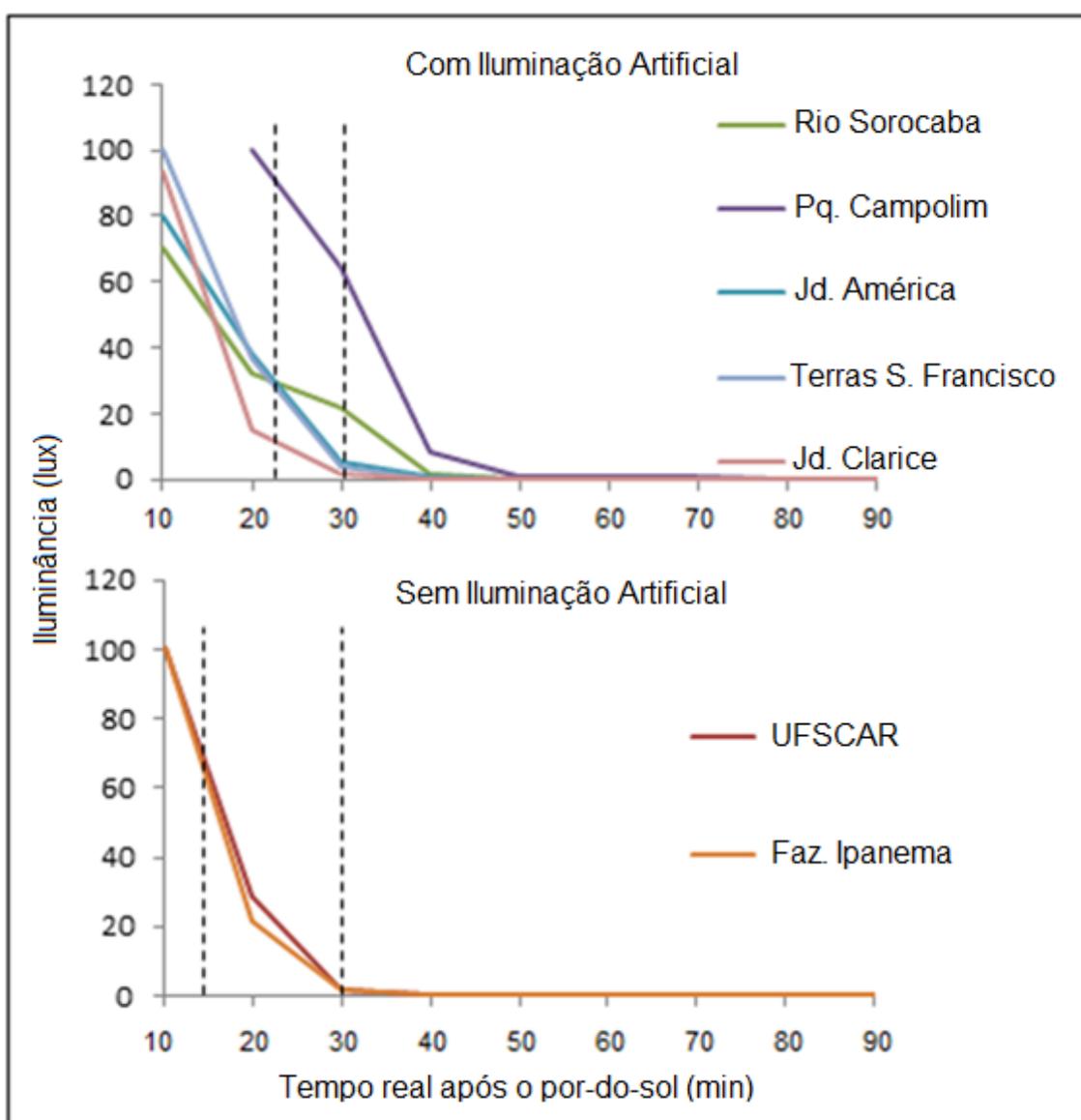
| Local | Influência antrópica | Período | Início da atividade | Fonte de luz | Iluminância (LUX) |
|--|--|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| Escola Regina Coutinho Nogueira, Campinas | 3-5 m de distância das salas de aula, prédio sob iluminação; crianças andando sobre a área durante o dia | Fevereiro - Março 1981-1982 | - | Mix fontes de luz incandescent e | - |
| Jd. Paineiras (Campinas) | Fazenda Perto de pastagens de gado | Outubro - Fevereiro 1983-1986 | - | Sem influência | - |
| Jd Palmeiras (Campinas) | Luzes da rua | Dezembro, 20/12/1999 | 16:00 | Luzes de Vapor de Mercúrio da rua | 1.6-6 |
| Faz Santana (Campinas) | Pastagem | Novembro- Março 1986-2015 | | Luz da casa (vapor de mercúrio) | 4,5 |
| Charco, Rod. Washington Luís | Charco | | | Sem influência | |

Fonte: Dados fornecidos pelo Professor Dr. Vadim Viviani.

5.3.3 Horário de atividade em áreas iluminadas artificialmente

As observações realizadas em ambientes com iluminação artificial contabilizaram 53 noites de observações e mostraram que houve um atraso no início de atividade de indivíduos desta espécie em relação a indivíduos localizados em ambientes sem iluminação artificial. Em média esse atraso foi de aproximadamente 10 minutos (figura 26).

Figura 26 – A - Decaimento da luz ambiental medido em lux. RS - Rio Sorocaba, marginal Dom Aguirre; PqC – Parque do Campolim; JdA - Jardim América; TSF - Terras de São Francisco, Salto de Pirapora, SP e JdC - Jardim Clarice. B - UFSCar - campus Sorocaba e FI - Fazenda Ipanema. As linhas tracejadas representam faixa temporal observada para o início de atividade de vagalumes *B. lividipennis*.



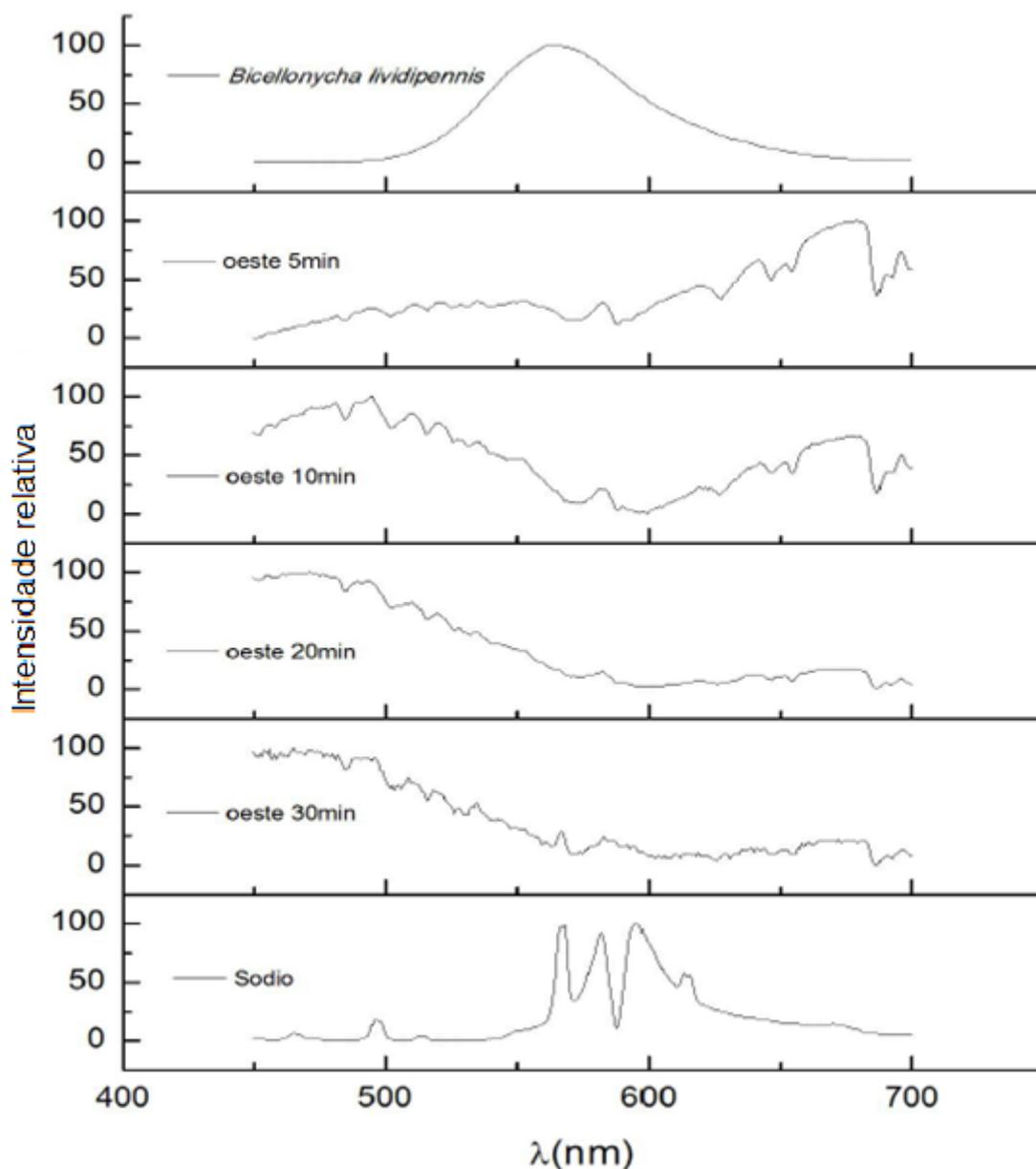
Fonte: Acervo do autor

Neste período de 10 min ocorre uma queda acentuada na iluminância ambiental em ambientes iluminados naturalmente pela luz do crepúsculo. Por outro lado, em ambientes com iluminação artificial mais intensa (Parque Campolim) em relação às outras localidades, foi possível notar um retardo na queda da iluminância ambiental. Nestas circunstâncias ocorre um atraso no início de atividade e também uma extensão no período de atividade desses vagalumes (tabela 4). O final de atividade em ambientes sem iluminação artificial ocorreu em média 60-80 min após o pôr do sol ($<0,03$ lux), enquanto em áreas afetadas pela iluminação artificial o final da atividade foi observado até 180 min após o pôr do sol ($\sim 0,08$ lux).

5.4 Composição Espectral da iluminação ambiental natural e artificial

A influência da composição espectral da iluminação noturna natural e artificial foram analisadas durante a atividade de *B. lividipennis*, através do registro de espectros de iluminância dos habitats após o pôr do sol no momento do início da atividade da espécie (Figura 27). No início do crepúsculo, em áreas sem iluminação artificial, o céu aberto é geralmente azul e predominantemente avermelhado no horizonte a oeste. O espectro de luz ambiental natural neste momento é relativamente mais contínuo com uma banda principal com pico na região do vermelho (~ 678 nm), e uma banda larga de menor intensidade na região do verde com um vale na região do amarelo. À medida que escurece, porém, o espectro de luz ambiental muda, com uma diminuição relativa na região do vermelho e um aumento relativo na região do azul, em noites não iluminadas pela lua. Cinco minutos após o pôr do sol, o componente vermelho ainda predomina e o componente azul é menor, com maior intensidade na região verde entre 500-550 nm. Cerca de 30 minutos após o pôr-do-sol, a componente verde-amarelo e principalmente o vermelho diminuem, enquanto o azul torna-se predominante. De um modo geral, há também uma percepção visual clara da semelhança da cromaticidade da iluminação de sódio e aquela do crepúsculo no horizonte (pôr do sol) durante o início de atividade desta espécie.

Figura 27 – Espectros de bioluminescência do vagalume *Bicellonycha lividipennis* Motschulsky 1854, de iluminação ambiental natural (com sensor direcionado para o Oeste) e de iluminação artificial vinda dos holofotes de vapor de sódio.



Fonte: Dados de trabalhos anteriores.

Durante o crepúsculo, o espectro de iluminância ambiental apresenta sobreposição considerável com o espectro de luz de sódio, sendo que ambos estão deslocados para a região amarelo/laranja. Para verificar essa sobreposição foram integradas as áreas de sobreposição dos espectros normalizados para o pico de intensidade do espectro de bioluminescência. O espectro de bioluminescência desta espécie ($\lambda_{\text{max}} = 564 \text{ nm}$) mostra apenas 35,65% de sobreposição entre 525 e 612 nm e 34,69% entre 500 a 592 nm de sobreposição com os espectros de luz natural crepuscular

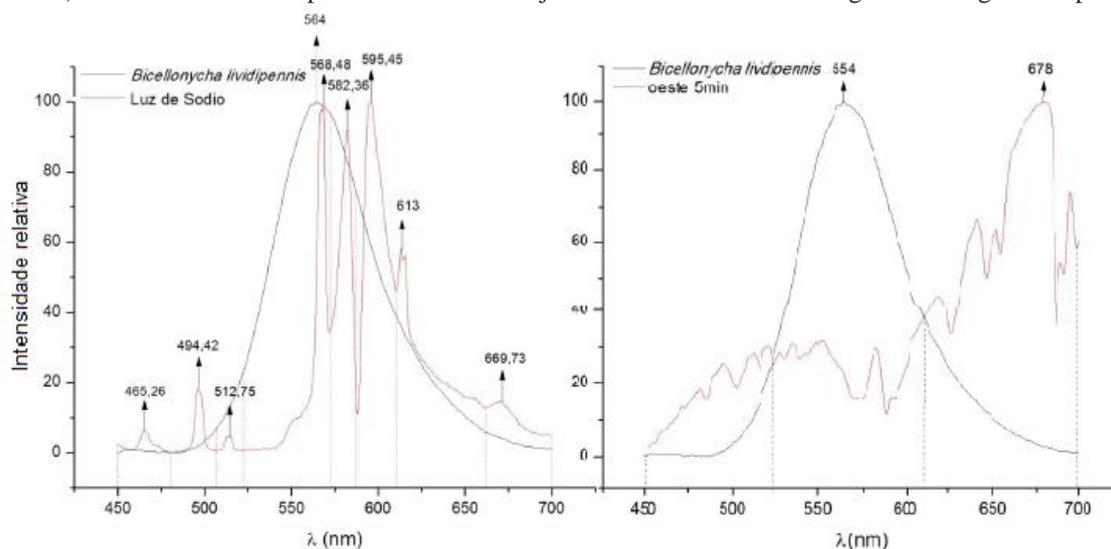
(5 minutos após o pôr-do-sol) com a lâmpada de sódio, respectivamente (tabela 6), e uma maior sobreposição em além destas faixas. Acima de 592 nm os espectros de iluminação crepuscular e de lâmpadas de vapor de sódio mostram 100% de sobreposição com o espectro de bioluminescência.

Tabela 6. Percentual da sobreposição espectral entre bioluminescência, iluminância ambiental no crepúsculo e lâmpada de sódio.

| Região (nm) | Sobreposição espectral | | |
|--------------|------------------------|------------|--------------|
| | Bioluminescência | Crepúsculo | Luz de sódio |
| 450 – 500 nm | 20,1 | - | 100 |
| 450 – 525 nm | 26,4 | 100 | - |
| 500 – 592 nm | 100 | - | 34,69 |
| 525 – 612 nm | 100 | 35,65 | - |
| 592 – 700 nm | 66,5 | - | 100 |
| 612 – 700 nm | 17,9 | 100 | - |

Assim, considerando que ainda há uma alta proporção de luz verde entre 500 e 550 nm no crepúsculo, causada pelo efeito de reflectância da vegetação, o espectro de bioluminescência desta espécie, que apresenta maior intensidade entre 550 e 570 nm, se destaca com menor sobreposição com o espectro de iluminação ambiental, o que está de acordo com a hipótese de contraste e otimização visual da bioluminescência (Lall *et al.*, 1980; LALL *et al.*, 1980b). É sabido que os vaga-lumes de espécies crepusculares também possuem pigmentos fotoestáveis nos olhos que filtram a luz na região verde refletida pela vegetação durante o crepúsculo, para maximizar a detecção de sinais bioluminescentes na região amarela (LALL, 1981). Além disto, embora o espectro de iluminação de vapor de sódio apresenta linhas espectrais (568, 582, 595 e 613 nm) e que se sobrepõe ao espectro de bioluminescência na região do amarelo-laranja, a região do verde ao verde-amarelo que antecede estas linhas espectrais (500-568 nm) quase não tem sobreposição espectral com a bioluminescência (figura 28).

Figura 28 – A. Sobreposição do espectro de luz de vapor de sódio com o espectro de bioluminescência; B. Sobreposição do espectro de bioluminescência com a iluminância crepuscular (5 minutos após o pôr-do-sol). As setas indicam os picos e as linhas tracejadas delimitam as áreas integradas na região dos picos.



6 DISCUSSÃO

Os vagalumes, por dependerem de sua bioluminescência e visualização para se comunicar, são organismos extremamente sensíveis a variações de intensidade de luz ambiental durante seu período de atividade. O início da atividade de várias espécies é ditado pela intensidade de iluminação ambiental, que vem do céu e especialmente refletidas pela vegetação. Além disto, os vagalumes, dependendo do habitat e horário de atividade, estão adaptados a diferentes ambientes fóticos. Engler (1993) destaca que, a otimização da relação do sinal luminoso e a iluminação de distintos habitats durante o crepúsculo podem conduzir a seleção de espectros de bioluminescência. Em ambientes cobertos por vegetação e próximos a florestas, durante o crepúsculo o espectro de luz ambiental predominante é o verde (ENDLER, 1993). De acordo com a hipótese de otimização da bioluminescência à sensibilidade visual de vagalumes, em condições naturais, a bioluminescência amarelada apresenta um bom contraste ao efeito fótico verde da vegetação no crepúsculo (Lall et al. 1980). Recentemente foi verificado que luz de cromaticidade vermelha afetam menos a atividade de vagalumes, enquanto luz azul e laranja tem maior efeito tendendo a reduzir o número de flashes (OWENS & LEWIS, 2018).

O início de atividade *B. lividipennis* ocorre durante o crepúsculo entre 10 e 15 minutos após o pôr-do-sol quando a iluminação ambiental natural é ≤ 8 Lux

permanecendo ativas até 60-80 minutos após o pôr-do-sol, quando a iluminação natural está em 0.05 Lux.

O espectro da iluminação artificial de vapor de sódio possui um espectro mais deslocado ao laranja, com boa sobreposição com o espectro de iluminação crepuscular, indicando que a luz de vapor de sódio pode simular parcialmente a luminosidade natural apresentada no período de atividade da *B. lividipennis*. Essa semelhança justifica a ocorrência e atividade de populações desta espécie em ambientes iluminados artificialmente com este tipo de fonte, diferentemente do que acontece com outras espécies (HAGEN *et al.*, 2015). Além disto, o espectro de bioluminescência de *B. lividipennis* apresenta maior intensidade na região do verde-amarelo (550-565 nm), com baixa sobreposição com os espectros de iluminação ambiental natural durante o crepúsculo, que apresenta predominância na faixa do verde (500 a 550 nm) e do laranja (> 590 nm), apresentando um vale nesta região, e da iluminação de vapor de sódio que apresenta picos de maior intensidade na região do amarelo e laranja (568, 582, 595 e 6213 nm). Apesar da grande sobreposição dos espectros de bioluminescência e iluminação de vapor de sódio na linha espectral de 568 nm, observa-se que ocorre pouca sobreposição na faixa de maior intensidade da bioluminescência no verde-amarelo (550-565 nm), inferindo-se que a visualização do sinal bioluminescente está maximizada nesta faixa, não afetando a comunicação intraespecífica e acasalamento.

Assim, a adaptação desses vaga-lumes em locais sob influência de iluminação artificial de vapor de sódio pode ser explicada por 3 fatores principais: (1) o início da atividade bioluminescente desta espécie se dá quando a iluminação ambiental natural ainda é elevada (≤ 8 Lux); (2) a composição espectral do céu crepuscular, que se sobrepõe em parte àquela da iluminação artificial de sódio, simula parcialmente o ambiente fótico, e (3) apesar da considerável sobreposição dos espectros de bioluminescência, iluminação natural do crepúsculo na faixa do verde (500-550 nm) e da iluminação artificial de vapor de sódio na faixa do amarelo-laranja (568-613 nm), existe um vale com pouca sobreposição na faixa do verde-amarelo (550-567 nm) em que a intensidade de bioluminescência é maior, sugerindo que o canal de visualização da bioluminescência nesta faixa esteja maximizado. De fato, estudos com espécies vespertinas mostram que a bioluminescência nesta faixa espectral está maximizada (Lall *et al.*, ; Lall *et al.*, 2022). O espectro de bioluminescência desta espécie tem um bom contraste ao efeito fótico verde da vegetação durante crepúsculo (Lall *et al.* 1980).

6.1 Impacto causado por derramamento de poluentes sobre população de *B. lividipennis* no Parque do Campolim

As observações realizadas no Parque do Campolim tiveram início em 2018 e se estenderam até 2021. Mesmo antes de 2017, já havia sido observada a ocorrência de uma população de vagalumes desta espécie estabelecida no local. Em geral foram observadas populações significativas de *B. lividipennis* nos meses de outubro a maio (tabela 4). Em dezembro de 2020, ocorreu um derramamento de produtos tóxicos próximo à lagoa, que posteriormente foi atingida por eles, através de dutos pluviais (Figura 28). Esses agentes poluentes levaram à morte de inúmeros peixes, e também ao declínio populacional e desaparecimento de *B. lividipennis*. Três dias após o ocorrido, foram realizadas observações no local, sendo possível contabilizar apenas dois indivíduos da espécie em atividade e duas semanas após já não se encontravam mais indivíduos. Notavelmente, nos anos que se sucederam, não foram mais observados indivíduos desta espécie, atestando o impacto severo, apesar do evento ter tido uma exposição midiática, segundo informações do jornal local (Jornal Cruzeiro do Sul) não foi possível categorizar o agente poluente, aparentemente trata-se de um derivado de petróleo.

Figura 29 – Parque do Campolim após derramamento do agente poluente



Fonte: Arquivo pessoal

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi possível observar que a espécie de vagalume *Bicellonycha lividipennis* é uma espécie comum em todo o Brasil, que é resiliente e facilmente adaptável em ambientes palustres sob impacto antrópico como pastagens brejosas. Adultos desta espécie palustre são crepusculares e menos suscetíveis à iluminação artificial de vapor de sódio. Vagalumes adultos foram encontrados em áreas sob influência considerável de luz de vapor de sódio. Apesar de ocorrerem em áreas iluminadas, observou-se que o período de atividade, em locais sob influência da iluminação de sódio, é ligeiramente atrasado em mais de 10 minutos. O menor efeito da iluminação artificial de sódio na ocorrência desta espécie, se deve aos seguintes fatores: (1) a iluminação artificial estar dentro ou inferior aos limites da iluminação natural durante o início da atividade da espécie, (2) a luz de sódio ter composição espectral que pode simular parcialmente a luz natural crepuscular no início da atividade, e (3) pela baixa sobreposição dos espectros de iluminação natural e artificial de sódio na região de maior intensidade da bioluminescência desta espécie, na região do verde-amarelo (550-565 nm), deixando um canal de visualização e comunicação por bioluminescência livre de outras interferências. Assim, estes resultados indicam que a luz de sódio pode ser menos impactante para espécies crepusculares que emitam luz nesta faixa do espectro. Entretanto, mais estudos são necessários para averiguar a influência da luz de sódio e de outras cromaticidades em outras espécies.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, Danilo Trabuco et al. Molecular phylogeny of Neotropical bioluminescent beetles (Coleoptera: Elateroidea) in Southern and central Brazil. **Luminescence**, v.29, p. 412-422, 2014.
- ARNOLDI, F.G.C. et al. Mitochondrial genome sequence of the Brazilian luminescent click beetle *Pyrophorus divergens* (Coleoptera: Elateridae): Mitochondrial genes utility to investigate the evolutionary history of Coleoptera and its bioluminescence. **Gene**, v. 405, p. 1-9, 2007.
- BAM, W. et al. Coupled effects of oil spill and hurricane on saltmarsh terrestrial arthropods. **PLOS ONE**, 13(4), 2018. DOI 10.1371/journal.pone.0194941.
- BARGHINI, A.; MEDEIRO, B. Gestão Ambiental: A Iluminação Artificial e o Impacto sobre o Meio Ambiente. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n.5, p. 4-15, 2006.
- BECHARA, E. J. H.; VIVIANI, V. R. Living Light in the Darkness: Facts and Stories. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 1, p. 3-40, 2015.
- BELLINGER, P. F.; CHRISTIANSEN, K.A.; JANSSENS, F. **Checklist of the Collembola of the World**. Disponível em: <http://www.collembola.org>. 1996.
- BIGGLEY, W. H., SELIGER, H. H. The Spectral Distribution of Firefly Light. II. **The Journal of General Physiology**, v. 50, n. 6, p. 1681–1692, 1967. DOI 10.1085/jgp.50.6.1681.
- BIRD, S.; PARKER, J. Low levels of light pollution may block the ability of male glow-worms (*Lampyrus noctiluca* L.) to locate females. **Journal of Insect Conservation**, v. 18, p. 737–743, 2014.
- BODAS TERASSI, P. M. de; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. de; GÓIS, G. de; & GALVANI, E. (2018). Variabilidade do Índice de Precipitação Padronizada na Região Norte do Estado do Paraná Associada aos Eventos de El Niño-Oscilação Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 1, p. 11–25. DOI 10.1590/0102-7786331002.
- BRANHAM, M., WENZEL, J. W. The origin of photic behavior and the evolution of sexual communication in fireflies (Coleoptera: Lampyridae). **Cladistics**, v. 19, n. 1, p. 1-22, 2003. DOI 10.1016/s0748-3007(02)00131-7.
- BUCK, J. B. The anatomy and physiology of the light organ in fireflies. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 49, n.3, p. 397–485, 1948. DOI 10.1111/j.1749-6632.1948.tb30944.x.
- BUCK, J. Unisex Flash Controls in Dialog Fireflies. **The Biological Bulletin**, v. 179, n. 1, p. 87-95, 1990. DOI 10.2307/1541742.
- BUZZI, Z. J.; MIYAZAKI, R. D. **Entomologia didática**. 4. ed, v. 1. 348 p. Curitiba: Editora da UFPR, 2002.

- CINZANO, P.; FALCHI, F.; ELVIDGE, C. D. The first world atlas of the artificial night sky brightness. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 328, n. 3, p. 689-707, 2001.
- COSTA, C. *Pyrearinus termitilluminans*, sp. N., with description of the immature stages (coleoptera, elateridae, pyrophorini). **Revista Brasileira de Zoologia**, São Paulo, v. 1, n. 1, p.23-30, 1982.
- COSTA, C. Estado de conocimiento de los Coleoptera neotropicales. **Revista Electrónica de La Comunidad Virtual de Entomología**, v. 1, p. 99-114, 2000.
- COSTA, C.; VANIN, S. A. Coleoptera Larval Fauna Associated with Termite Nests (Isoptera) with Emphasis on the “Bioluminescent Termite Nests” from Central Brazil. **Psyche: A Journal of Entomology**, p. 1-12, 2012. DOI 10.1155/2010/723947.
- COSTIN, K.J. & Boulton, A.M. A field experiment on the effect of introduced light pollution on fireflies (Coleoptera: Lampyridae) in the Piedmont Region of Maryland. **The Coleopterists Bulletin**, v. 70, p. 84-86, 2016.
- DAVIS, A. J.; HOLLOWAY, J. D.; HUIJBREGTS, H.; KRIKKEN, J.; KIRK-SPRIGGS, A. H. & SUTTON, S. L. Dung beetles as indicators of change in the forests of northern Borneo. **Journal of Applied Ecology**, v. 38, p. 593-616, 2001.
- De Cock, R. (2004). Larval and Adult Emission Spectra of Bioluminescence in Three European Firefly Species. **Photochemistry and Photobiology**, v. 79, n. 4, p. 339, 2004. DOI: 10.1562/2003-11-11-ra.1.
- DE COCK, R. Biology and behavior of european lampyrids. In: MEYER-ROCHOW, V. B. **Bioluminescence in focus: a collection of illuminating essays**. Trivandrum: Research Signpost, 2009. p. 161-200.
- DE GROOT, R. S.; WILSON, M. A.; BOUMANS, R. M. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. **Ecological Economics**, v. 41, n. 3, p. 393–408, 2002. DOI 10.1016/s0921-8009(02)00089-7.
- DISQUE, H. H. et al. Effects of clothianidin-treated seed on arthropod community in a mid-Atlantic no-till corn agroecosystem. **Pest Management Science**, v. 75, n. 4, p. 969-978, 2018.
- DUNLAP, J.C. Molecular Bases for Circadian Clocks. **Cell**, v. 96, n. 2, p. 271-290, 1999. DOI 10.1016/s0092-8674(00)80566-8.
- ENDLER, J. A. Signals, Signal Conditions, and the Direction of Evolution. **The American Naturalist**, v. 139, p. 125-S153, 1992. DOI 10.1086/285308.
- ENDLER, J. A. The Color of Light in Forests and Its Implications. **Ecological Monographs**, v. 63, n.1, p. 1-27, 1993. DOI 10.2307/2937121.
- FALASCHI, R. L., JOHNSON, G. A.; STEVANI, C. V. The new species

Neoceroplatus betaryiensis nov. sp. (Diptera: Keroplatidae) from Neotropical Region. **Papéis Avulsos de Zoologia**, v. 59, 2019. DOI 10.11606/1807-0205/2019.59.44.

FALCHI, F. et al. The new world atlas of artificial night sky brightness. **Science Advances**, v. 2, n. 6, p. 1-25, 2016.

FIREBAUGH, A. & HAYNES, K. J. Experimental tests of light pollution impacts on nocturnal insect courtship and dispersal. **Oecologia**, v. 182, p. 1203-1211, 2016.

FRANK, K. D.; RICH, C.; LONGCORE, T. Effects of artificial night lighting on moths. **Ecological consequences of artificial night lighting**, p. 305-344, 2006.

FREITAS, J. R. de et al. Exposure of tropical ecosystems to artificial light at night: Brazil as a case study. **PLOS ONE**, v. 12, n. 2, 2017. DOI 10.1371/journal.pone.0171655.

GARDINER, T. & DIDHAM, R. K. Glowing, glowing, gone? Monitoring long-term trends in glow-worm numbers in south-east England. **Insect Conservation and Diversity**, v. 13, p. 162–174, 2020.

GARGAGLIONI, S. Poluição luminosa e a necessidade de uma legislação. **Comciência**, Campinas, n. 112, 2009.

GARTNER, A. Nature's Place: Human Population and the Future of Biological Diversity. **Pacific Conservation Biology**, v. 6, n. 3, p. 275, 2000. DOI 10.1071/pc000275.

GASTON, K. J.; DUFFY, J. P.; GASTON, S.; BENNIE, J. & DAVIES, T. W. Human alteration of natural light cycles: causes and ecological consequences. **Oecologia**, v. 176, p. 917–931, 2014.

GOMES, L. E. de O. et al. The impacts of the Samarco mine tailing spill on the Rio Doce estuary, Eastern Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, v. 120, n. 1-2, p. 28-36, 2017. DOI 10.1016/j.marpolbul.2017.04.056.

GONÇALVES-SOUZA, D.; VERBURG, P.H. & DOBROVOLSKI, R. Habitat loss, extinction predictability and conservation efforts in the terrestrial ecoregions. **Biological Conservation**, v. 246, 2020.

GUETTÉ, A.; GODET, L.; JUIGNER, M. & ROBIN, M. Worldwide increase in Artificial Light at Night around protected areas and within biodiversity hotspots. **Biological Conservation**, v. 223, p. 97–103, 2018.

HADDOCK, S. H. D., MOLINE, M. A.; CASE, J. F. Bioluminescence in the Sea. **Annual Review of Marine Science**, v. 2, n.1, p. 443-493, 2010. DOI 10.1146/annurev-marine-120308-081028.

HAGEN, O., et al. Artificial Night Lighting Reduces Firefly (Coleoptera: Lampyridae) Occurrence in Sorocaba, Brazil. **Advances in Entomology**, v. 3, p. 24-32, 2015.

- HALL, D. W. et al. The evolution of adult light emission color in North American fireflies. **Evolution**, v. 70, n. 9, p. 2033-2048, 2016. DOI 10.1111/evo.13002.
- HANSON, F. E. et al. Synchrony and Flash Entrainment in a New Guinea Firefly. **Science**, v. 174, n. 4005, p. 161-164, 1971. DOI 10.1126/science.174.4005.161.
- HARVEY, E. N. A History of Luminescence – From the Earliest Times Until 1900. **The American Philosophical Society**, Philadelphia, 1957.
- HASTINGS, J. W. Biological diversity, chemical mechanisms and evolutionary origins of bioluminescent systems. **Journal of Molecular Evolution**, Basingstoke, v. 19, p. 309-321, 1983.
- HERRING, P. J. A Classification of luminous organisms. In: HENRRING, P. J. (Ed.). **Bioluminescence in Action**. New York: Academic Press, 1978.
- HIRATA, R. C. A.; FERREIRA, L. M. R. Os aquíferos da bacia hidrográfica do alto tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 1, n. 31, p. 43-50, 2001.
- HOLT, E. A.; MILLER, S. W. Bioindicators: Using Organisms to Measure Environmental Impacts. **Nature Education Knowledge**, v. 2, n. 2, p. 8, 2011.
- INEICHEN, S. & RUTTIMANN, B. Impact of artificial light on the distribution of the common European glow-worm, *Lampyris noctiluca* (Coleoptera: Lampyridae). **Lampyrid**, v. 2, p. 31-36, 2002.
- JOHNSEN, S. A.; KELBER, E. J.; WARRANT, A. M.; SWEENEY, E. A.; WIDDER, R. L.; LEE, J., and J. HERNÁNDEZ-ANDRÉS. 2006. Crepuscular and nocturnal illumination and its effects on color perception by the nocturnal hawkmoth *Deilephila elpenor*. *Journal of Experimental Biology*, v. 209, p. 789–800.
- KARROUCH, L.; CHAHLAOUI, A.; ESSAHALE, A. Anthropogenic Impacts on the Distribution and Biodiversity of Benthic Macroinvertebrates and Water Quality of the Boufekrane River, Meknes, Morocco. **Journal of Geoscience and Environment Protection**, v. 5, p. 173-195, 2017.
- KYBA, C. C. M.; RUHTZ, T.; FISCHER, J.; HÖLKER, F. Red is the new black: how the colour of urban skyglow varies with cloud cover. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 425, n. 1, p. 701-708, 2012.
- LALL, A. B. Electroretinogram and the spectral sensitivity of the compound eyes in the firefly *Photuris versicolor* (Coleoptera-Lampyridae): A correspondence between green sensitivity and species bioluminescence emission. **Journal of Insect Physiology**, v. 27, n. 7, p. 461–468, 1981. DOI 10.1016/0022-1910(81)90097-4.
- LALL, A. B. et al. Ecology of Colors of Firefly Bioluminescence. **Science**, v. 210, n. 4469, p. 560-562, 1980b. DOI 10.1126/science.210.4469.560.

LALL, A. B., LORD, E. T.; TROUTH, C. O. Vision in the firefly *Photuris lucicrescens* (Coleoptera: Lampyridae): Spectral sensitivity and selective adaptation in the compound eye. **Journal of Comparative Physiology A**, v. 147, n. 2, p. 195–200, 1982. DOI 10.1007/bf00609844.

LALL, A. B.; LLOYD, J. E. Spectral sensitivity of the compound eyes in two day-active fireflies (Coleoptera: Lampyridae: Lucidota). **Journal of Comparative Physiology A**, v. 166, p. 257-260, 1989.

LALL, A. B. et al. Spectral mechanism of the compound eye in the firefly *Photinus pyralis* (coleoptera: Lampyridae). **Journal of Comparative Physiology A**, v. 135, p. 21-27, 1980.

LEWIS, S. M. Bioluminescence and sexual signaling in fireflies. In: MEYES-ROCHOW, V. B. Bioluminescence in Focus: a collection of illuminating essays. **Research Signpost**, Kerala, p. 147-159, 2009.

LEWIS, S. M.; CRATSLEY, C. K. Flash Signal Evolution, Mate Choice, and Predation in Fireflies. **Annual Review of Entomology**, v. 53, n. 1, p. 293-321, 2008. DOI 10.1146/annurev.ento.53.103106.093346.

LEWIS, S. M. et al. A global perspective on firefly extinction threats. **BioScience**, v. 70, p. 157–167, 2020.

LLOYD, J. E. Bioluminescence and communication in insects. **Annual Review of Entomology**, v. 38, p. 131-160, 1983.

LLOYD, J. E. Stray light, fireflies, and fireflies. In: RICH, C.; LONGCORE, T. **Ecological consequences of artificial night lighting**. Washington: Island Press, 2006. p. 345-364.

LLOYD, J. E. Studies on the Flash Communication System of *Photinus* Fireflies. Museum of Zoology, **University of Michigan Miscellaneous Publications**, v. 130, p. 1-95, 1966.

LLOYD, J. E. Where are the lightningbugs? **Fireflyer Companion**, v. 1, p. 1-2, 1993.

LONGCORE, T.; RICH, C. Ecological light pollution. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 2, n. 4, p. 191-198, 2004.

MARTINE, G. O lugar do espaço na equação população/meio ambiente. **Revista Brasileira de Estudos de População**, v. 24, n. 2, p. 181-190, 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbepop/v24n2/01>. Acesso em: 19 ago. 2018.

MATTHEWS, R. A. et al. Biological monitoring. **Water Research**, v. 16, n. 2, p. 129-139, 1982. DOI 10.1016/0043-1354(82)90102-6.

MEDEIROS, B. A. S. et al. Streetlights attract a broad array of beetle species. **Revista Brasileira de Entomologia**, 2016.

MOREIRA, A. C., AMARAL, D. T., GABRIEL, G.V.M. et al. Cloning and molecular properties of a novel luciferase from the Brazilian *Bicellonycha lividipennis* (Lampyridae: Photurinae) firefly: comparison with other firefly luciferases. **Photochemical & Photobiological Sciences**, 2022.

NICHOLS, E. et al. Global dung beetle response to tropical forest modification and fragmentation: A quantitative literature review and metaanalysis. **Biological Conservation**, v. 137, p. 1-19, 2007.

NICHOLS, E. et al. Ecological functions and ecosystem services provided by Scarabaeinae dung beetles. **Biological Conservation**, v. 141, n. 6, p. 1461-1474, 2008. DOI 10.1016/j.biocon.2008.04.011.

NIELSEN, E. T. Illumination at Twilight. **Oikos**, v. 14, n. 1, p. 9, 1963. DOI 10.2307/3564956.

OBA, Y.; BRANHAM, M. A.; FUKATSU, T. The Terrestrial Bioluminescent Animals of Japan. **Zoological Science**, v. 28, n. 11, p. 771-789, 2011. DOI 10.2108/zsj.28.771.

OHBA, N. Flash Communication Systems of Japanese Fireflies. **Integrative and Comparative Biology**, v. 44, n. 3, p. 225-233, 2004. DOI 10.1093/icb/44.3.225.

OLIVEIRA, S. S. et al. Checklist of the Bibionomorpha (Diptera) of the state of Mato Grosso do Sul, Brazil. **Iheringia, Série Zoologia**, v. 107, n. Suppl., 2017.

OPERTI, F. G.; OLIVEIRA, E. A.; CARMONA, H. A.; MACHADO, J. C. & ANDRADE, J. S. The light pollution as a surrogate for urban population of the US cities. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 492, p. 1088–1096, 2018.

OWENS, A.C.S., DRESSLER, C.T. & LEWIS, S.M. Costs and benefits of “insect friendly” artificial lights are taxon specific. *Oecologia* 199, 487–497 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00442-022-05189-6>

OWENS, A. C. S.; MEYER-ROCHOW, V.B. & YANG, E. Short- and mid wavelength artificial light influences the flash signals of *Aquatica ficta* fireflies (Coleoptera: Lampyridae). **PLoS One**, v. 13, 2018.

OWENS, A. C. S., & LEWIS, S. M. (2018). The impact of artificial light at night on nocturnal insects: A review and synthesis. *Ecology and Evolution*. doi:10.1002/ece3.4557

PERKIN, E. K.; HÖLKER, F.; TOCKNER, K. The effects of artificial lighting on adult aquatic and terrestrial insects. **Freshwater Biology**, v. 59, n. 2, p. 368-377, 2014.

PICCHI, M. S. et al. Fireflies and land use in an urban landscape: the case of *Luciola italica* L. (Coleoptera: Lampyridae) in the city of Turin. **Journal of Insect Conservation**, v. 17, n. 4, p. 797-805, 2013. DOI 10.1007/s10841-013-9562-z.

PISA, L. et al. Effects of neonicotinoids and fipronil on nontarget invertebrates.

Environmental Science and Pollution Research International, v. 22, p. 68–102, 2015.

QUEIROZ, H. M. et al. The Samarco mine tailing disaster: a possible time-bomb for heavy metals contamination?. **Science of the Total Environment**, v. 637, p. 498-506, 2018.

RAMSEY K. R. et al. The clockwork of metabolism. **Annual Review of Nutrition**, v. 27, p. 219-240, 2007.

RAYEES DAR, M.; ROOF RATHER, A. Chronobiology and Its General Perspectives. **Chronobiology - The Science of Biological Time Structure**, 2019. DOI 10.5772/intechopen.86629.

REDFORD, K. H. Prey attraction as a possible function of bioluminescence in the larvae of pyrearinus termitilluminans (coleoptera: elateridae). **Revista Brasileira de Zoologia**, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 31-34, 1982.

RICH, C.; LONGCORE, T. (eds.). **Ecological Consequences of Artificial Night Lighting**. Washington, D.C: Island Press, 2006.

SALIÉS, E. et al. CARTILHA DE FOTOPOLUIÇÃO. **Fundação Pró Tamar**, 2014. Disponível em: http://tamar.org.br/arquivos/cartilha%20fotopoluicao_V2014.pdf. Acesso em: 27 jul. 2018.

SANCHEZ-BAYO, F. 2011 Pesticide impacts of agricultural pesticides on terrestrial ecosystems. In: Sanchez-Bayo F, van den Brink PJ, Mann RM (eds.). **Ecological Impacts of Toxic Chemicals**. **Bentham Science**, p. 63-87, 2011.

SANTOS, R. M.; SCHLINDWEIN, M. N.; VIVIANI, V. R. Survey of Bioluminescent Coleoptera in the Atlantic Rain Forest of Serra da Paranapiacaba in São Paulo State (Brazil). **Biota Neotrópica**, v. 16, 2016.

SCHWALB, H. H. Beiträge zur Biologie der einheimischen Lampyriden *Lampyrus noctiluca* Geoffr. und *Phausis splendidula* Lec. und experimentelle Analyse ihres Beutefang- und Sexualsverhaltens. **Zoologische Jahrbücher für Systematik**, v. 88, p. 399-550, 1961.

SEIXAS, D. C.; OLIVEIRA, V. C.; OLIVEIRA, A. M. Índice de integridade biótica utilizando insetos aquáticos em igarapés sob influência do desmatamento nos municípios de Santarém e Belterra (Pará). **I Congresso de Iniciação Científica PIBIC/CNPq - PAIC/FAPEAM**. Manaus, 2012.

SELIGER, H. H. et al. Flash patterns in Jamaican fireflies. **The biological bulletin**, v. 127, n. 1, p. 159–172, 1964. DOI 10.2307/1539352.

SHAFIE, M. S. et al. The use of aquatic insects as bio-indicator to monitor freshwater stream health of Liwagu River, Sabah, Malaysia. **Journal of Entomology and Zoology Studies**, v. 4, n. 5, p. 1662-1666, 2017.

SHARIFIAN, S. et al. Light emission miracle in the sea and preeminent applications of bioluminescence in recent new biotechnology. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 172, p. 115–128, 2017. DOI 10.1016/j.jphotobiol.2017.05.021.

SHIMOMURA, O. Presence of coelenterazine in non-bioluminescent marine organisms. **Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Comparative Biochemistry**, v. 86, n. 2, p. 361-363, 1987.

SHRESTHA, S.; ADHIKARI, P. L. Investigating Temporal Variation of Water Quality and Benthic Macroinvertebrates in Taudaha Lake, Kathmandu, Nepal. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 8, p. 1283-1296, 2016.

SIMON, C. et al. Evolution, weighting, and phylogenetic utility of mitochondrial gene sequences and a compilation of conserved polymerase chain reaction primers. **Annals of Entomological Society of America**, v. 87, n. 6, p. 651-701, 1994.

STANGER-HALL, K. F.; LLOYD, J. E. Flash signal evolution in Photinus fireflies: Character displacement and signal exploitation in a visual communication system. **Evolution**, v. 69, n. 3, p. 666–682, 2015. DOI 10.1111/evo.12606.

TRIPLEHORN, C. A.; JOHNSON, N. F. 2005. **Borror and DeLong's Introduction to the Study of Insects**. 7th ed. Belmont: Thomson Brooks/Cole, 2005.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 97–112. 2008. DOI 10.1590/s0103-40142008000200007.

VERHEIJEN, F. J. Photopollution: artificial light optic spatial control systems fail to cope with. Incidents, causations, remedies. **The Journal of Experimental Biology**, v. 44, p. 1-18, 1985.

VIVIANI, V. R. Luciferases de vagalumes. **Biotecnologia e Desenvolvimento**, v. 37, p. 8-19, 2007.

VIVIANI, V. R. et al. Orfelia-type luciferin and its associated storage protein in the non-luminescent cave worm *Neoditomyia* sp. (Diptera: Keroplatidae) from the Atlantic rainforest: biological and evolutionary implications. **Photochemical & Photobiological Sciences**, 2018. DOI 10.1039/c8pp00207j.

VIVIANI, V. R. Fireflies (Coleoptera: Lampyridae) from Southeastern Brazil: Habitats, Life History, and Bioluminescence. **Annals of the Entomological Society of America**, v. 94, n. 1, p. 129-145, 2001. DOI 10.1603/0013-8746(2001)094[0129:fclfsb]2.0.co;2.

VIVIANI, V. R. Levantamento e ecologia das espécies de lampirídeos do município de Campinas. **Bioikos**, v. 2, n. 1, p. 40-42, 1989.

VIVIANI, V. R. The origin, diversity, and structure function relationships of insect luciferases. **Cellular and Molecular Life Sciences**, v. 59, n. 11, p. 1833-1850, 2002. DOI 10.1007/pl00012509.

VIVIANI, V. R.; BECHARA, E. J. H. Bioluminescence and Biological Aspects of

Brazilian Railroad-Worms (Coleoptera: Phengodidae). **Annals of the Entomological Society of America**, v. 90, n. 3, p. 389-398, 1997. DOI 10.1093/aesa/90.3.389.

VIVIANI, V. R.; ROCHA, M. Y.; HAGEN, O. Fauna de besouros bioluminescentes (Coleóptera: Elateroidea: Lampyridae; Phengodidae, Elateridae) nos municípios de Campinas, Sorocaba-Votorantim e Rio Claro-Limeira (SP, Brasil): biodiversidade e influência da urbanização. **Biota Neotrópica**, v. 10, n. 2, p. 103-116, 2010. DOI 10.1590/s1676-06032010000200013.

WING, S. R. Female monogamy and male competition in *Photinus collustrans* (Coleoptera: Lampyridae). **Psyche**, Cambridge, v. 91, n. 1, 1992.

ZOLNERKEVIC, I. O impacto da luz sobre as florestas: Poluição luminosa fica mais intensa e pode afetar ecossistemas brasileiros. **Revista Fapesp: Ambiente**, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 58-59, 2017.

APÊNDICE A

