



UFRGS
UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL



INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOLOGIA ANIMAL

BRUNO TUBINO NORONHA

**DETECTABILIDADE ACÚSTICA DE VERTEBRADOS TERRESTRES ATRAVÉS DE
SIMULAÇÕES COM ONDAS SONORAS SINTÉTICAS**

PORTO ALEGRE

2020

BRUNO TUBINO NORONHA

**DETECTABILIDADE ACÚSTICA DE VERTEBRADOS TERRESTRES ATRAVÉS DE
SIMULAÇÕES COM ONDAS SONORAS SINTÉTICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Animal, Instituto de Biociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Biologia Animal.

Área de concentração: Biologia e Comportamento Animal

Orientador: Dr. Murilo Guimarães

Coorientadora: Dra. Maria João Ramos Pereira

PORTO ALEGRE
2020

BRUNO TUBINO NORONHA

**DETECTABILIDADE ACÚSTICA DE VERTEBRADOS TERRESTRES ATRAVÉS DE
SIMULAÇÕES COM ONDAS SONORAS SINTÉTICAS**

Aprovada em 10 de julho de 2020.

BANCA EXAMINADORA

Dra. Lilian Sander Hoffmann

Dra. Valentina Zaffaroni Caorsi

Dr. Edison Zefa

“Quando os cientistas passaram a analisar o mundo bioacústico sob o ponto de vista dos animais estudados, descobriu-se fenômenos surpreendentes: os morcegos produzem ultrassons e ouvem os seus ecos para se orientarem no espaço; os elefantes se comunicam à distância emitindo infrassons. Mas nem os mais sofisticados equipamentos garantem que estejamos registrando e conhecendo toda a comunicação animal.”

(Eliane Gonçalves de Freitas e Silvia Mitiko Nishida)

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, quero agradecer a minha família que sempre me incentivou a seguir estudando e a atingir meus objetivos, especialmente ao meu avô Hέλvio, falecido no decorrer do meu Mestrado, ao qual devo muito e serei eternamente grato. Agradeço imensamente a minha esposa Luciana por estar sempre ao meu lado, me apoiando e sendo compreensiva com as minhas horas de dedicação a esse estudo. Agradeço aos meus filhos, Sofia e Lucas, pelo simples fato de existirem e tornarem minha vida plena e feliz. Vocês são os motivos e as motivações para tudo que eu almejo.

Agradeço aos meus orientadores Murilo e Maria João por todos os ensinamentos e pela compreensão ante os percalços que enfrentei por conciliar serviço e paternidade com o Mestrado. Sinto-me honrado pela oportunidade de ser orientado por pessoas tão qualificadas. Agradeço aos professores Márcio Borges e Jorge Quillfeldt por seus apontamentos nas bancas de acompanhamento. Demais professores do PPGBAN também fazem jus a agradecimentos por proporcionarem muito conhecimento via as diversas disciplinas oferecidas. Igualmente, deixo minha gratidão ao professor Fábio Azevedo, do Departamento de Matemática, já que me auxiliou no desenvolvimento e entendimento da equação para estimar a distância máxima de detecção de um som. Além deles, sou grato ao senhor Elmar Jongerius da empresa Apodemus, porque me passou todas as diretrizes para gerar ultrassons puros de única frequência, o que me fez vencer uma grande dificuldade enfrentada no início do projeto.

Agradeço muito à colega Adriana que foi uma excelente tutora, me ensinando bastante sobre gravadores de som e Bioacústica de morcegos. Sua ajuda e parceria nos primeiros campos foram realmente fundamentais, assim como da colega Luiza. Outras presenças constantes como meus auxiliares no meio das matas foram as dos meus amigos irmãos Lilian, Vagner e Hudson. Obrigado por estarem juntos comigo nessa empreitada, suportando picadas de mosquito e arranhões de galhos. Ainda em se tratando dos campos, não posso deixar de agradecer às equipes da Reserva Biológica do Lami e do Parque Estadual de Itapuã, as quais prontamente estiveram à disposição.

Agradeço ao pessoal do local onde trabalho (Laboratório de Palinologia Marleni Marques Toigo/IGeo/UFRGS), principalmente ao meu chefe Paulo, por dar suporte a todas as vezes que precisei parar as atividades como técnico para me dedicar ao Mestrado. Enfim, agradeço a UFRGS de forma geral, porque essa instituição que tanto prezo vem possibilitando a minha formação em diversas instâncias e áreas da Biologia, desde minha entrada como aluno em 2005 e como servidor em 2009.

SUMÁRIO

RESUMO.....	1
ABSTRACT.....	2
1. INTRODUÇÃO.....	3
1.1. Elementos básicos de Acústica.....	3
1.2. Efeitos ambientais sobre o som ao ar livre.....	8
1.2.1. Dispersão geométrica.....	9
1.2.2. Atenuação atmosférica (efeitos da temperatura, umidade e pressão).....	12
1.2.3. Efeito do vento.....	15
1.2.4. Efeito da vegetação.....	17
1.2.5. Efeito da direcionalidade do som (efeito do ângulo).....	20
1.2.6. Efeito do ruído sonoro de fundo.....	21
1.3. Bioacústica e seu uso para monitorar vertebrados terrestres.....	22
1.4. Os sons emitidos por anuros.....	24
1.5. Os sons emitidos por aves.....	26
1.6. Os sons emitidos por morcegos.....	28
1.7. Detectabilidade de vertebrados terrestres em AAP.....	30
2. OBJETIVOS.....	35
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36

RESUMO

Amostragens acústicas passivas têm sido utilizadas cada vez mais para o estudo de vertebrados terrestres, resultando em diversos tipos de análise como identificação taxonômica, distribuição de espécies, dinâmica de populações e comportamento animal. Contudo, a distância de detecção das espécies visadas por um gravador de sons autônomo geralmente é desconhecida. Da mesma forma, os fatores que afetam a detecção de cada vocalização no exato local e momento da amostragem raramente são abordados com a devida importância. No presente estudo, sons sintéticos representativos das frequências de anuros, aves e morcegos foram emitidos e gravados no interior de matas a fim de estimar a detectabilidade acústica desses animais conforme fatores físicos. A faixa audível utilizada correspondeu a sons puros de 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 6 kHz, 8 kHz e 10 kHz, enquanto a faixa de ultrassons foi de 20 kHz a 120 kHz, em intervalos de 10 kHz. As distâncias lineares de gravação foram de 1 m, 2 m, 4 m, 8 m, 16 m e 32 m da fonte sonora. Os sons foram emitidos a 2 m e 5 m, com gravação sempre a 2 m. A densidade e a agregação vegetal foram mensuradas por fotografia em cada distância e dados meteorológicos foram extraídos durante as amostragens. Através de modelos lineares generalizados, verificou-se que sons audíveis emitidos a 2 m do solo tiveram sua intensidade reduzida por aparatos vegetais, mas aumentada por ventos supostamente no mesmo sentido da propagação sonora. Os mesmos sons emitidos a 5 m do solo foram detectados com menor intensidade, porém dosséis fechados e ventos amenizaram as perdas sonoras. Para a faixa dos ultrassons, a frequência sonora foi suficiente para explicar boa parte da variação nos níveis sonoros nas emissões a 2 m do solo, enquanto o ângulo entre fonte e gravador na altura de emissão de 5 m foi determinante para a não detecção dos sons cuja frequência ultrapassava 70 kHz. O coeficiente de atenuação atmosférica conforme norma ISO 9613-1 mostrou-se eficiente para prever as variações de intensidade dos ultrassons além da dispersão geométrica esperada quando fonte e gravador estavam alinhados. Considerando a dificuldade em prever todos os efeitos que as ondas sonoras sofrerão em cada ambiente, foi proposto um modelo matemático com algoritmos associados que inclui o coeficiente de atenuação atmosférica e uma medida empírica da transmissão sonora no local da amostragem, entre outras variáveis. Esse modelo estima a distância máxima de detecção de um som sob determinadas condições físicas. A aplicabilidade dessa distância possibilita delimitar o espaçamento entre estações amostrais, comparar amostragens realizadas em diferentes contextos ambientais e estimar a ocorrência de espécies considerando seus padrões de vocalização.

Palavras-chave: amostragem acústica, espaço de detecção, distância máxima, atenuação atmosférica, simulação acústica, sons puros

ABSTRACT

Passive acoustic monitoring has been widely used to study terrestrial vertebrates in many ways, including taxonomic identification, species distribution, population dynamics and animal behavior. However, the detection distance of targeted species by autonomous recording units is generally unknown. Likewise, factors influencing detection of each vocalization at the exact sampling site and time are rarely addressed. Here, synthetic sounds representing the frequencies of frogs, birds and bats were emitted and recorded inside forests to relate the acoustic detectability of these animals with physical factors. The audible bands used corresponded to pure sounds of 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 6 kHz, 8 kHz and 10 kHz, while the ultrasounds ranged from 20 kHz to 120 kHz, in 10 kHz intervals. The linear recording distances were 1 m, 2 m, 4 m, 8 m, 16 m and 32 m from the sound source. The emission height changed from 2 m to 5 m, and the recording height remained at 2 m. Vegetal density and aggregation were measured by photographs taken at each distance and meteorological data was obtained during the samplings. Using generalized linear models, it was found that intensity of audible sounds emitted at 2 m from the ground were reduced by vegetal barriers and increased by winds, supposedly in the same direction of sound propagation. Sounds emitted at 5 m high were detected with less intensity, although closed canopies and winds mitigated sound loss, perhaps because they respectively reflect and refract waves downwards. For ultrasound bands, the sound frequency explained much of the variation in sound levels in emissions at 2 m high, whereas the angle between source and recorder at the 5 m high was decisive for the non-detection of sounds above 70 kHz. The atmospheric attenuation coefficient, according to ISO 9613-1, was efficient to predict the intensity of ultrasounds beyond the expected geometric dispersion, when the source and the recorder were aligned. Considering the difficulty in predicting all the effects on sound waves in each environment, a mathematical model was proposed including the atmospheric attenuation coefficient and an empirical measure of the sound transmission at the sampling site, among other variables. This model estimates the maximum sound detection distance under certain physical conditions. The applicability of this model opens a venue to delimit the spacing between sampling stations, to compare sampling from different environments and to estimate specie's occurrence, considering their vocalization patterns.

Keywords: acoustic sampling, sound detection space, maximum distance, atmospheric attenuation, acoustic simulation, pure sounds

1. INTRODUÇÃO

1.1. Elementos básicos de Acústica

Acústica é a ciência que estuda o som, abordando desde sua origem a partir de uma fonte, seu fluxo energético através de um meio físico, até sua detecção por um receptor (Kuttruff 2007). Assim, envolve a análise da propagação sonora sob o aspecto do ambiente em que ocorre e dos fatores que a afetam, incluindo aqueles relacionados à nossa capacidade de detectar um som. Essa ciência antiga – cuja existência data do século VI A.C. - é a base de muitos fenômenos fundamentais e de numerosas aplicações, tendo papel primordial em processos de desenvolvimento científico (Kuttruff 2007, Rossing 2014, Anselmet & Mattei 2016).

O som pode ser definido como uma onda mecânica, propagante e, comumente, longitudinal. A primeira característica baseia-se no fato de necessitar de um meio elástico para ocorrer, o qual pode ser gasoso, líquido ou sólido. A segunda qualidade refere-se à irradiação do som com certa velocidade a partir do ponto onde é gerado. Já o caráter longitudinal deve-se ao movimento na mesma direção do fluido que perturba, como quando se propaga na atmosfera. De fato, o ar é o meio de referência para as principais explicações que tangem as ondas sonoras. Estas transferem energia para as moléculas gasosas, de modo a comprimi-las e descomprimi-las em cada ciclo de um pulso sinusoidal progressivo. Por isso, na clássica representação gráfica de uma onda, a zona de alta pressão do ar corresponde à crista, enquanto a área de baixa pressão relaciona-se ao vale dessa mesma onda (Beranek 2006, Chaves 2007, Rossing 2014, Figura 1A).

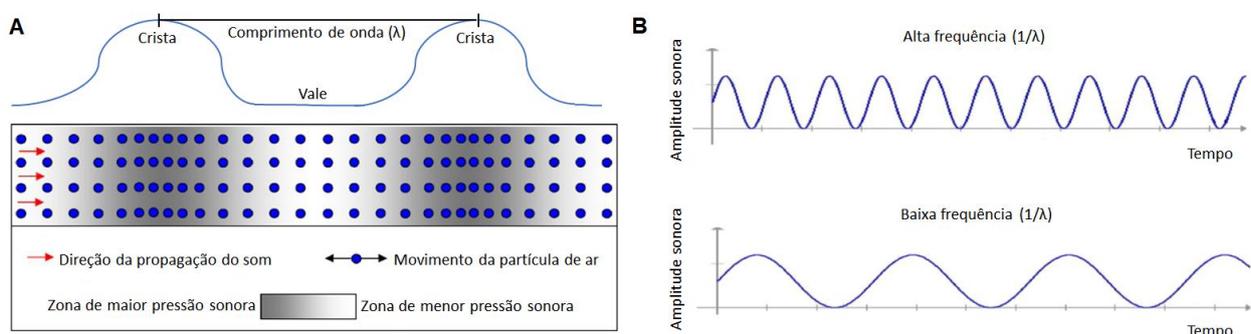


Figura 1. Representações da propagação da onda sonora. **A.** Compressão e descompressão das partículas de ar pelo som relacionada à caracteres básicos de uma onda. Adaptada de Chong (2012). **B.** Gráficos de amplitude por tempo de sons de alta e baixa frequência. Adaptada de <https://anasaes1.wordpress.com/2011/01/31/>.

As principais propriedades empregadas na descrição de um som são amplitude e frequência (Figura 1B). A amplitude consiste no deslocamento máximo atingido pela crista ou vale de uma onda e define a intensidade sonora. A frequência equivale ao número de ciclos sinusoidais por unidade de tempo e está associada ao caráter agudo ou grave de um som. Sua magnitude é inversa ao comprimento de onda, o qual representa a distância entre duas cristas ou dois vales de onda consecutivos (Figuras 1A e 1B). Independentemente dessas grandezas, a velocidade do som está sob função apenas das características do meio no qual se propaga, conforme propriedade fundamental de qualquer onda mecânica. Portanto, sua velocidade é diretamente proporcional à densidade e à elasticidade do meio, sendo constante ao longo de todo o trajeto de propagação se as condições desse meio permanecerem as mesmas (Beranek 2006, Kuttruff 2007, Halliday *et al.* 2012, Rossing 2014, Wahlberg & Larsen 2017).

No que tange apenas à frequência, o ouvido humano responde quase que exclusivamente ao espectro que inicia acerca de 15 Hz e termina em torno de 16 kHz (Beranek 2006). Tal espectro é então definido como faixa normal de sons audíveis. Por conseguinte, sons que não se enquadram nesse intervalo recebem nomenclaturas distintas: são infrassons ou ultrassons. Os primeiros referem-se a ondas sonoras de frequência abaixo da audição humana. Os últimos, a frequências muito altas para serem escutadas por nós (Beranek 2006, Halliday *et al.* 2012, Rossing 2014).

Uma onda sonora pode compreender um tom puro de única frequência ou uma combinação de frequências de número variável. De qualquer forma, os sons são usualmente caracterizados por só uma frequência representativa ou por um limitado número delas. Logo, tem-se os termos banda larga e banda estreita, que, respectivamente, definem sons com muita ou pouca variação de frequência. As variações múltiplas de uma mesma frequência fundamental formam uma série harmônica. Um som pode ser uni ou multi-harmônico, dependendo justamente do número de frequências múltiplas da fundamental. De fato, descrever um som pela frequência das suas ondas é o passo mais crucial para devidamente associá-lo aos efeitos ambientais a que está sujeito. Como ondas que diferem em frequência propagam-se de maneira independente, é possível analisar a geração, a propagação e a detecção de cada frequência sonora separadamente (Beranek 2006, Chaves 2007, Pierce 2014).

A detecção ou não de um som é determinada pela medida da sua amplitude, ou seja, pela intensidade ou pressão sonora atingida em certo ponto do espaço. A intensidade descreve a densidade de energia carregada pela onda através de uma área

perpendicular ao seu sentido de propagação. Ressalta-se que a energia sonora, por si só, é intrínseca à fonte emissora e não se altera com a distância de propagação. Porém, conforme as ondas sonoras deslocam-se, essa energia distribui-se por uma área cada vez maior. Logo, a intensidade de um som reduz à proporção que ele se afasta da fonte (Lefebvre 1998, Beranek 2006, Wahlberg & Larsen 2017).

Outro termo muito utilizado para se referir à amplitude do som é a pressão sonora. Essa grandeza é definida como a diferença instantânea entre a pressão total imposta pelo som e a pressão estática do meio, que no caso da atmosfera é $101,3 \times 10^3$ Pa. O nível de pressão sonora é análogo ao nível de intensidade, pois ambos tratam da mesma variação de energia acústica. Via de regra, expressa-se o nível de pressão de um som como aquele referente à frequência de maior energia. Tal medida deve ocorrer sob condições atmosféricas normais, em dada distância frontal do emissor. Para a maioria das vocalizações de animais, por exemplo, cita-se o valor mensurado a 1 m do indivíduo (Beranek 2006, Wahlberg & Larsen 2017).

O ouvido humano é capaz de perceber sons que variam dentro de uma ampla faixa de pressão: de aproximadamente $20 \mu\text{Pa}$ até cerca de 200 Pa. O menor valor equivale a uma variação da pressão atmosférica normal de apenas 2×10^{-10} Pa. Por essa razão, é mais conveniente lidar com uma escala de medida relativa ao invés de valores absolutos. Logo, os níveis sonoros são geralmente expressos por logaritmos que comprimem essa extensa e minuciosa variação. Na principal escala, cada aumento de nível na magnitude de dez vezes pode ser representado pela alteração de 10 decibéis (dB). Por isso, na Acústica, calcula-se os níveis de energia, intensidade e pressão - todos os quais referentes à amplitude sonora - pelo logaritmo da razão entre um valor mensurado e outro de referência (equações 1.1, 1.2 e 1.3 respectivamente, Beranek 2006, Breazeale & McPherson 2014).

$$NE = 10 \times \log_{10} \left(\frac{E}{E_0} \right) \quad (1.1)$$

Onde:

NE = nível de energia sonora (dB)

E = energia instantânea (W)

E_0 = energia inicial (W) ou de referência (10^{-12} W)

$$NI = 10 \times \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (1.2)$$

Onde:

NI = nível de intensidade sonora (dB)

I = intensidade instantânea (W/m^2)

I_0 = intensidade inicial (W/m^2) ou valor de referência (10^{-12} W/m^2)

$$NP = 10 \times \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right)^2 \quad (1.3)$$

Onde:

NP = nível de pressão sonora (dB)

P = pressão instantânea (N/m^2 ou Pa)

P_0 = pressão inicial (N/m^2) ou de referência (2×10^{-5} N/m^2 , equivale a 20 μPa)

As equações apresentadas demonstram claramente que o decibel não corresponde a uma unidade típica de medida, e sim a um valor relativo dentro de determinada escala. Por exemplo, quando se afirma que um som possui 50 dB, comumente significa que ele é 100.000 vezes mais alto que o limite da audição humana para 1 kHz sob pressão atmosférica inicial de 20 μPa . Por padronização, esse limite é o valor de referência mais empregado em medidas de nível sonoro (Beranek 2006, Wilson *et al.* 2013, Breazeale & McPherson 2014).

Independente de qual seja a frequência e a amplitude, todo som está sujeito a fenômenos ondulatórios, como difração, refração, reflexão, reverberação e absorção (Figura 2). A difração do som ocorre quando as ondas contornam obstáculos intransponíveis, de mesma ordem de grandeza que o comprimento delas. A refração acontece nas vezes em que o som atravessa estratos de diferentes condições, desviando sua direção para a zona na qual se propaga em menor velocidade. Já a reflexão pode ser observada quando ondas são rebatidas para o lado oposto ao incidirem sobre uma superfície resistente à passagem do som, definida como impedante. Além do eco, outro exemplo disso é a reverberação, fenômeno ocasionado por ondas refletidas reiteradamente que se superpõem àquelas emitidas. Quando há superposição, ondas se encontram e somam-se algebricamente para gerar um pulso resultante. Pode haver então interferências construtivas (se duas cristas coincidem) ou interferências destrutivas (se o encontro é de crista com vale). Quanto à absorção sonora, esta inclui a perda direta de energia do som para o meio por onde se propaga ou para o obstáculo no qual incide, seja por atrito viscoso ou por transferência de calor para as partículas agitadas. Parte do som absorvido pode ainda ser transmitido através do obstáculo (Beranek 2006, Kuttruff 2006, Rossing 2014).

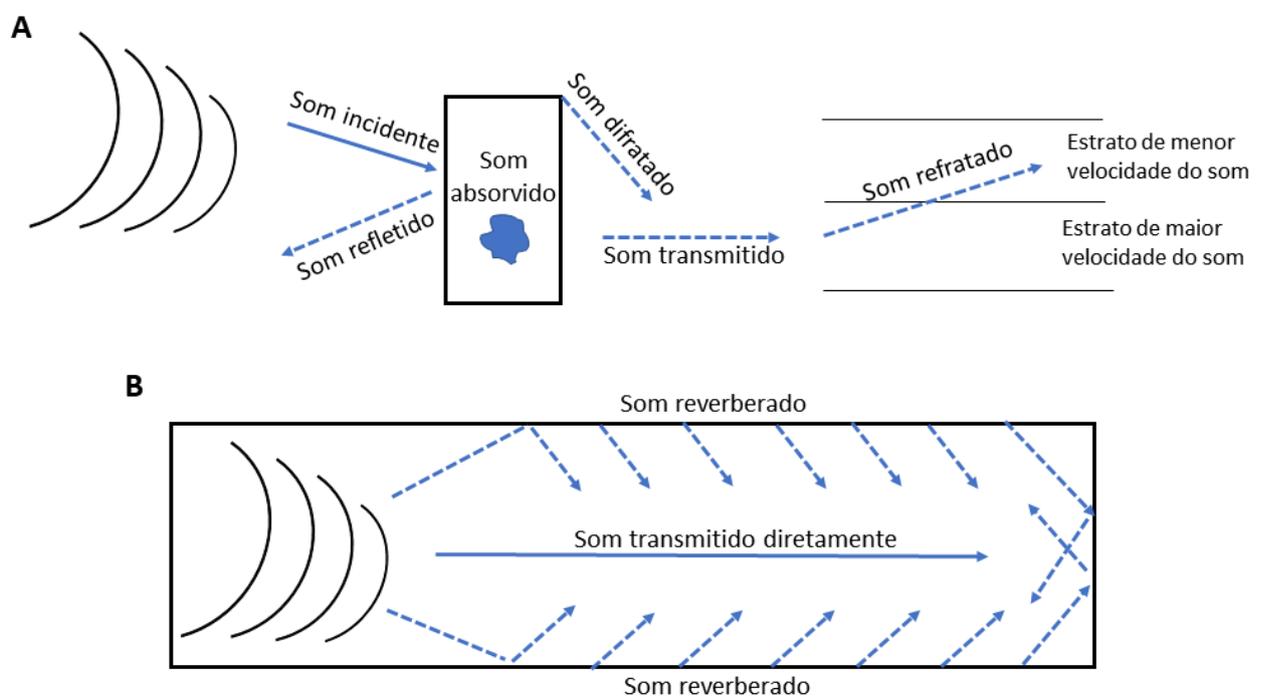


Figura 2. Representação de fenômenos ondulatórios aos quais um som está sujeito. **A.** Frentes de onda transmitidas em ambiente aberto sobre um obstáculo (retângulo), ilustrando reflexão, absorção, difração e, após, refração. **B.** Frentes de onda transmitidas em ambiente fechado com inúmeras reverberações. Adaptadas de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>.

1.2. Efeitos ambientais sobre o som ao ar livre

Em ambientes naturais, ondas sonoras que se deslocam pelo ar têm sua energia afetada por diversos fatores. Tradicionalmente, a perda de intensidade do som pode ser explicada por dispersão geométrica e atenuação de excesso. A primeira trata-se da redução energética esperada conforme as ondas se afastam da fonte. A segunda concatena todos os outros fatores que afetam a variação da amplitude sonora ao longo da propagação. Alternativamente, alguns autores fazem uso do termo atenuação normal, o qual une dispersão geométrica com atenuação atmosférica (Embleton 1996, Bucur 2005). Entretanto, diferentemente dessa atenuação pelas partículas do meio fluido, que é linear por metro percorrido pelo som, a dispersão geométrica apresenta relação logarítmica com a distância, além de ser independente da frequência emitida (Kuttruff 2006, Gjelland & Hedger 2017, Wahlberg & Larsen 2017).

Inúmeros fatores contribuem para a atenuação de excesso total sofrida por sons propagados na natureza (Figura 3). Entre as principais influências sobre as ondas sonoras estão os efeitos da temperatura, da umidade e da pressão do ar, do vento, do solo e da vegetação (Wahlberg & Larsen 2017). Apesar do uso generalizado do termo atenuação, tais efeitos podem também gerar alguma concentração da energia das ondas e assim amenizar a perda de intensidade esperada pela dispersão geométrica (Attenborough 2014). Além dos fatores referidos como atenuação de excesso, a direcionalidade do som e o ruído de fundo do ambiente por vezes têm papel importante na detecção sonora (Lang *et al.* 2006, Wahlberg & Larsen 2017).

A importância dos efeitos do solo e de gradientes de temperatura é vista somente em situações específicas. O solo pode agir como um refletor capaz de aumentar ou reduzir a propagação sonora, o que dependerá da impedância de sua superfície e de como a onda incidirá sobre ela. Todavia, acredita-se que o efeito do solo ocorra apenas quando fonte e receptor estão próximos do chão, sendo irrelevante a partir de 2 m de altura e imprevisível quando a composição do solo é complexa, como em matas (Marten & Marler 1977, Wilson *et al.* 2013, Attenborough 2014). Já gradientes verticais de temperatura fazem as ondas sonoras refratarem rumo ao estrato mais frio, onde se propagam em menor velocidade, mas costumam ter efeito perceptível só quando o som percorre mais de 100 m, principalmente em área aberta (Kurze & Anderson 2006). As condições atmosféricas mais homogêneas do interior de matas parecem atenuar tais gradientes (Morton 1975). Logo, por não serem muito aplicáveis ao experimento do

presente estudo (vide 2. Objetivos), os efeitos do solo e de gradientes de temperatura não serão tratados com detalhes, ao contrário dos demais.

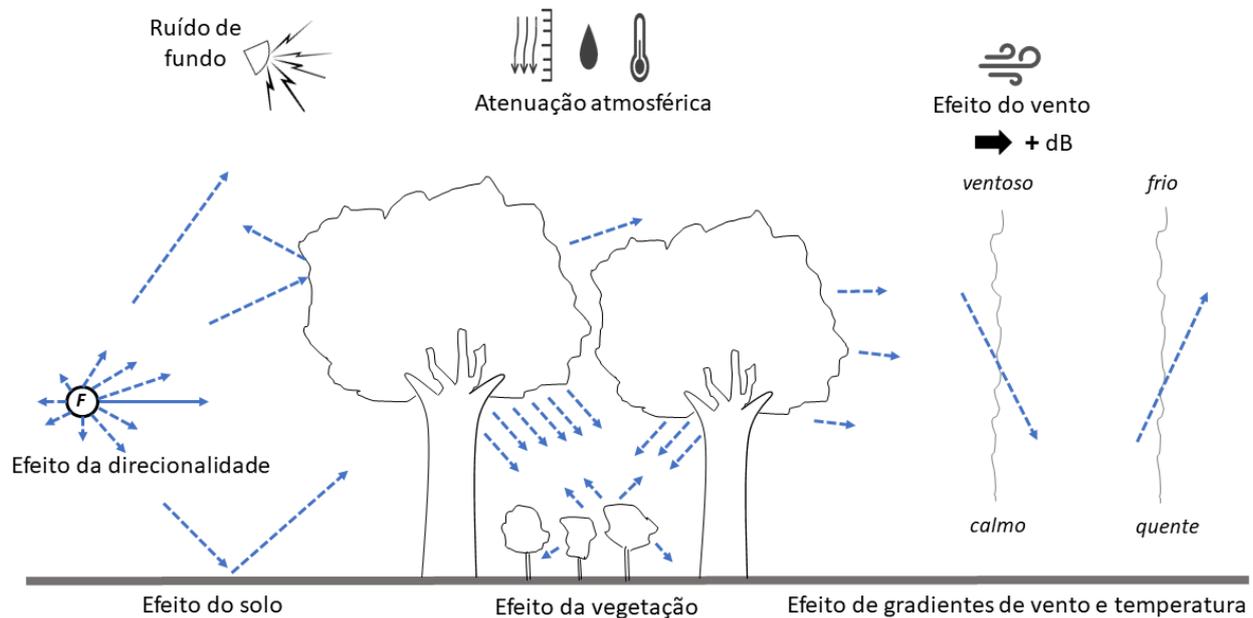


Figura 3. Efeitos ambientais adicionais à dispersão geométrica de um som propagado ao ar livre. A seta azul em linha contínua representa um teórico percurso direto do som, enquanto as setas com linhas pontilhadas ilustram alguns efeitos que ondas podem sofrer em um ambiente natural. A seta relacionada ao efeito do vento mostra um sentido do deslocamento de ar coincidente com o sentido de propagação som, o que tende a aumentar os níveis sonoros e a refratar ondas para baixo. Inspirada em Anderson & Kruze (1992) e Wilson *et al.* (2013).

1.2.1. Dispersão geométrica

A dispersão geométrica é o fator mais importante para reduzir os níveis sonoros, ao menos nos primeiros metros de distância da fonte. A lei de dispersão geométrica - também denominada de lei do inverso dos quadrados - dita que a intensidade de um som emitido a partir de uma fonte decai conforme o quadrado da distância radial, independentemente de amplitude inicial e frequência. Isso se baseia no conceito fundamental da Acústica de que a mesma quantidade de energia sonora emitida tende a fluir para uma área esférica cada vez maior. Como a área de qualquer esfera é dada por $4\pi r^2$, a intensidade sonora pode ser expressa por $E/(4\pi r^2)$, onde E representa a energia do som. Por esse motivo, cada vez que a distância equivalente ao raio dobra, a intensidade sonora reduz ao quadrado. Assim, o nível a 2 m da fonte é quatro vezes

menor do que era a 1 m (Figura 4, Beranek 2006, Wilson *et al.* 2013, Pierce 2014, Wahlberg & Larsen 2017).

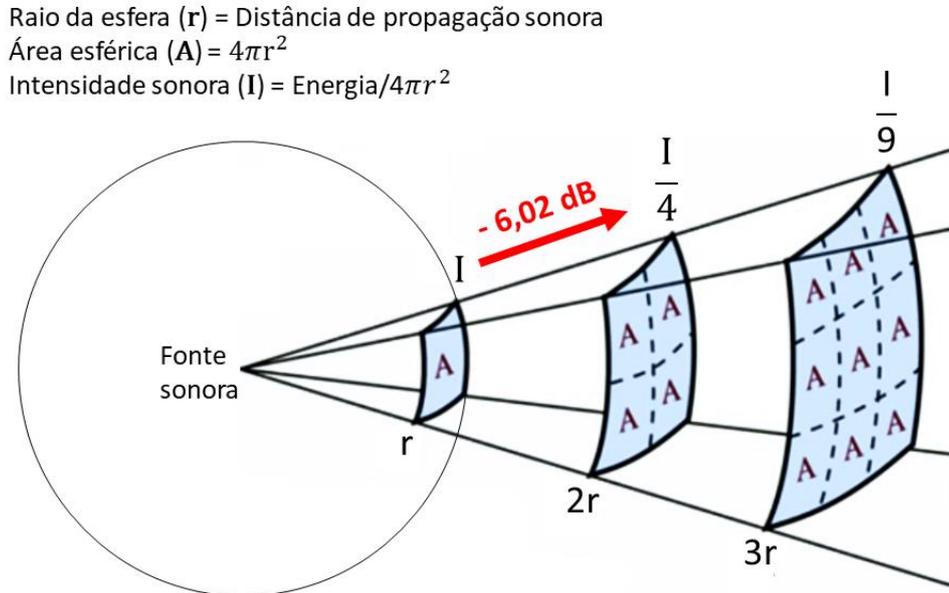


Figura 4. Esquema da dispersão geométrica mais comum do som (do tipo esférica), ressaltando a relação logarítmica entre intensidade sonora e distância de propagação. Adaptada de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>.

Considerando que a energia de um som é constante e que a intensidade depende da área, a lei do inverso dos quadrados resulta na Equação 1.4. Dessa forma, a razão entre as intensidades mensuradas em duas distâncias do trajeto de propagação do som - ambas de frente para a fonte - é igual à razão destas distâncias ao quadrado (Wilson *et al.* 2013).

$$\frac{I_f}{I_0} = \left(\frac{D_0}{D_f} \right)^2 \quad (1.4)$$

Onde:

I_f = intensidade na distância final (W/m^2)

I_0 = intensidade na distância inicial (W/m^2)

D_0 = distância inicial (m)

D_f = distância final (m)

Por meio da Equação 1.4, deriva-se o cálculo direto de um nível sonoro com apenas o valor de duas distâncias. Basta substituir a razão da Equação 1.2 por seu equivalente dado pela Equação 1.4. Assim, chega-se à expressão final da Equação 1.5. A partir da qual, é possível entender por que o nível de intensidade de um som decresce 6,02 dB a cada dobro de distância por simples dispersão geométrica (Figura 4, Wilson *et al.* 2013).

$$DG = 10 \times \log_{10} \left(\frac{D_o}{D_f} \right)^2 = 20 \times \log_{10} \left(\frac{1}{2} \right) = - 6,02 \quad (1.5)$$

Onde:

DG = dispersão geométrica do som entre duas distâncias (dB)

D_o = distância inicial (m)

D_f = distância final (m)

Com base nos cálculos referentes à dispersão geométrica, pode-se deduzir quanto o nível sonoro tende a variar de um ponto ao outro do trajeto do som. Contudo, salienta-se que, nesse modelo, não está inclusa qualquer atenuação ou amplificação do som por outro fator, sendo a intensidade dependente apenas da distância percorrida. Trata-se, portanto, da perda de amplitude esperada para qualquer som que se propaga em ambiente aberto sem sofrer nenhum efeito adicional (Pierce 2014, Wahlberg & Larsen 2017).

Cabe ressaltar também que a dispersão geométrica mencionada aqui é a do tipo esférica, a mais genérica (Figura 4). Porém, se o som atravessar um ambiente rodeado por estruturas que formam um duto de passagem para ele, essa dispersão passa a ser cilíndrica. Nesses casos, as ondas sonoras expandem-se por uma área equivalente à de um cilindro, mensurada por $2\pi r^2$. Logo, o nível de intensidade passa a ser calculada por $10\log(D_f/d_o)$. Isso representa uma perda de apenas 3 dB a cada dobro de distância, metade do previsto em uma dispersão esférica (Heimann *et al* 2012, Wahlberg & Larsen 2017).

1.2.2. Atenuação atmosférica (efeitos da temperatura, umidade e pressão)

Uma parte da energia acústica é sempre absorvida pelo ar. Essa absorção ou atenuação atmosférica é diretamente proporcional à distância percorrida pelo som. Dá-se por três causas: condutividade térmica, viscosidade do meio e troca de energia pelas moléculas do ar. Esta última caracteriza-se como relaxação ou absorção molecular. As duas primeiras são referidas como absorção clássica. A condutividade térmica corresponde à simples transformação da energia acústica em calor, conforme propriedade fundamental do transporte por gases. A viscosidade corresponde ao grau de fricção entre partículas (Evans *et al.* 1972, Attenborough 2014).

A absorção molecular diz respeito à transformação da energia cinética das partículas perturbadas pelo som em energia interna para elas (Evans *et al.* 1972). Mais especificamente, refere-se à rotação das moléculas do ar ou à vibração das moléculas diatômicas de oxigênio e nitrogênio. Estas vibram em frequências que podem atenuar, ainda mais, o som incidente (Wilson *et al.* 2013, Pierce 2014, Liptai *et al.* 2015).

Todos os processos envolvidos na atenuação atmosférica dependem da temperatura, da umidade e da pressão do ar (Wilson *et al.* 2013). Contudo, a perda energética de um som é muito maior em virtude da absorção molecular do que pela absorção clássica (Schreiber & Beckenbauer 2012). Por exemplo, a elevação da temperatura aumenta o estado de excitação das moléculas, fazendo-as vibrar e rotar mais intensamente. Visto que a relaxação de um gás é medida pelo grau de colisão de suas partículas, ela também está sob função da pressão atmosférica absoluta: varia inversamente a esta medida, dada a mesma temperatura. Tem-se ainda a influência da umidade diretamente sobre a absorção molecular. Apesar de ocorrer em número relativamente pequeno e variável no ar, as moléculas de água possuem alta probabilidade de colidir com as de oxigênio e nitrogênio. Obviamente, isso altera o estado de relaxação total das partículas aéreas (Pierce 2014).

Quanto à influência de alguma propriedade do som, a atenuação atmosférica tende a aumentar conforme, aproximadamente, o quadrado da frequência sonora. Logo, é o principal fator a restringir a propagação de sons de alta frequência (Daigle 2007, Attenborough 2014). Essa restrição é bem menor para sons na faixa das frequências audíveis, a ponto de ser insignificante por dezenas de metros iniciais de uma propagação. Entretanto, para distâncias superiores a 100 m, a atenuação atmosférica tende a prevalecer sobre a dispersão geométrica de qualquer som, tornando-se

responsável pela maior parte da perda de intensidade sonora (Arrieta *et al.* 1993, Pierce 2014).

De qualquer forma, por haver duas relevantes frequências de vibração envolvidas - uma associada ao oxigênio e outra ao nitrogênio -, a relação entre frequência sonora e atenuação atmosférica não é única, mesmo sob idênticas condições meteorológicas. Isso porque sons de baixíssima frequência - menores que 1kHz - são atenuados pela vibração do nitrogênio, enquanto sons de frequência intermediária - entre 1 e 10 kHz - perdem intensidade principalmente devido à vibração do oxigênio. Por sua vez, sons de frequências maiores que 10 kHz - bem acima daquelas da vibração de ambos os gases - sofrem forte atenuação, mas essencialmente pelos processos de absorção clássica e rotação das moléculas do ar (Wilson *et al.* 2013, Pierce 2014).

É possível estabelecer uma certa proporcionalidade linear e positiva entre frequência do som e atenuação atmosférica total. O mesmo não é válido para a relação desse fator com os valores de temperatura, umidade e pressão do ar (Goerlitz 2018). Porém, pode-se afirmar que a temperatura e a umidade exercem influência muito maior do que a pressão atmosférica (Arrieta *et al.* 1993, Goerlitz 2018). Além disso, espera-se que a umidade só tenha efeito atenuante significativo para frequências superiores a 1 kHz (Liptai *et al.* 2015). De qualquer forma, a energia acústica será absorvida pela atmosfera dependendo da combinação entre frequência sonora, temperatura, umidade e pressão do ar (Embleton *et al.* 1976, 1996).

A complexidade das relações desses quatro parâmetros é evidenciada pelo cálculo do coeficiente de atenuação atmosférica (α) conforme o método padronizado ISO 9613-1 (ISO 1993a). Sua fórmula final encontra bases no estudo de Evans *et al.* (1972) e nas suas subsequentes correções (Bass *et al.* 1990, 1995). Para se chegar ao valor de α em dB/m, calcula-se antes a absorção clássica, dada pela Equação 1.6. Também são necessários os dois valores referentes à absorção molecular. Visando estes, é preciso calcular primeiramente a concentração molar do vapor d'água, denominada umidade absoluta do ar (Eq. 1.7). Tendo esse dado, podem ser feitos os cálculos das frequências de relaxação, em Hertz, do oxigênio (Eq. 1.8) e do nitrogênio (Eq. 1.9). Com ambas as frequências, chegam-se às absorções associadas ao oxigênio e ao nitrogênio através das Equações 1.10 e 1.11, respectivamente. Dessa forma, finalmente, têm-se todos os números de entrada da Equação 1.12 que resolve α .

$$A_C = \frac{(1,84 \times 10^{-11})}{(P/P_{ref})} \times \left(\frac{T_{kel}}{T_{ref}} \right)^{1/2} \quad (1.6)$$

$$U = U_{rel} \times \frac{10^{[-6,83 \times (T_{01}/T_{kel})^{1,2610} + 4,6151]}}{(P/P_{ref})} \quad (1.7)$$

$$F_{rO} = \frac{P}{P_{ref}} \times \left[24 + \frac{40400 \times U \times (0,02 + U)}{(0,391 + U)} \right] \quad (1.8)$$

$$F_{rN} = \frac{P}{P_{ref}} \times \left(\frac{T_{kel}}{T_{ref}} \right)^{-1/2} \times \left\{ 9 + 280 \times U \times e^{-4,17 \times \left[\left(\frac{T_{kel}}{T_{ref}} \right)^{-1/3} - 1 \right]} \right\} \quad (1.9)$$

$$A_O = (1,275 \times 10^{-2}) \times e^{(-2239,1/T_{kel})} \times \left(F_{rO} + \frac{F^2}{F_{rO}} \right)^{-1} \quad (1.10)$$

$$A_N = (10,680 \times 10^{-2}) \times e^{(-3352/T_{kel})} \times \left(F_{rN} + \frac{F^2}{F_{rN}} \right)^{-1} \quad (1.11)$$

$$\alpha = 20 \times \log_{10} e \times F^2 \times \left[A_C + \left(\frac{T_{kel}}{T_{ref}} \right)^{-5/2} \times (A_O + A_N) \right] \quad (1.12)$$

Onde:

A_C = absorção clássica (W/m)

A_O = absorção molecular por oxigênio (W/m)

A_N = absorção molecular por nitrogênio (W/m)

F_{rO} = frequência de relaxação do oxigênio (Hz)

F_{rN} = frequência de relaxação do nitrogênio (Hz)

U = umidade absoluta do ar (mol/L)

U_{rel} = umidade relativa do ar (%)

α = coeficiente de atenuação atmosférica (dB/m)

e = constante de Neper (2,718282)

T_{kel} = temperatura ambiental em Kelvin (K) (valor em °C + 253,15)

T_{ref} = temperatura de referência (273,15 K, equivalente a 20 °C)

T_{01} = temperatura do ponto triplo da água pura, atingido a 611 Pa, onde podem coexistir os três estados físicos da água (273,16 K, equivalente a 0,01 °C)

P = pressão atmosférica ambiental (kPa)

P_{ref} = pressão atmosférica de referência (101,325 kPa, equivalente a 1 atm)

F = frequência do som (Hz)

1.2.3. Efeito do vento

Ventos sempre ocasionam gradientes no sistema atmosférico, devido a variação de sua velocidade em cada estrato vertical. A velocidade do vento aumenta com a altura de maneira não linear, até cerca de 10 m do solo. Entretanto, o vento exerce influência direta sobre um som apenas quando está contra ou a favor da direção de emissão. Se há exclusivamente ventos cruzando a transeção entre emissor e receptor, não se espera nenhuma interferência eólica na transmissão sonora (Wahlberg & Larsen 2017).

Caso vento e som estejam na mesma direção, a velocidade das ondas sonoras aumenta na mesma proporção da velocidade do vento. Isso pode fazer com que mais energia acústica atinja distâncias maiores, amenizando as perdas esperadas. Ademais, devido ao gradiente formado, as ondas refratam para baixo, onde o vento está mais fraco e lhes impõe menor velocidade. O efeito é o inverso quando ventos se opõem à direção do som: as ondas tornam-se mais lentas conforme a força do vento e por isso refratam para cima. Nesse caso, é provável que a perda de intensidade das ondas seja maior que o previsto (Figura 5, Kurze & Anderson 2006, Attenborough 2014, Wahlberg & Larsen 2017).

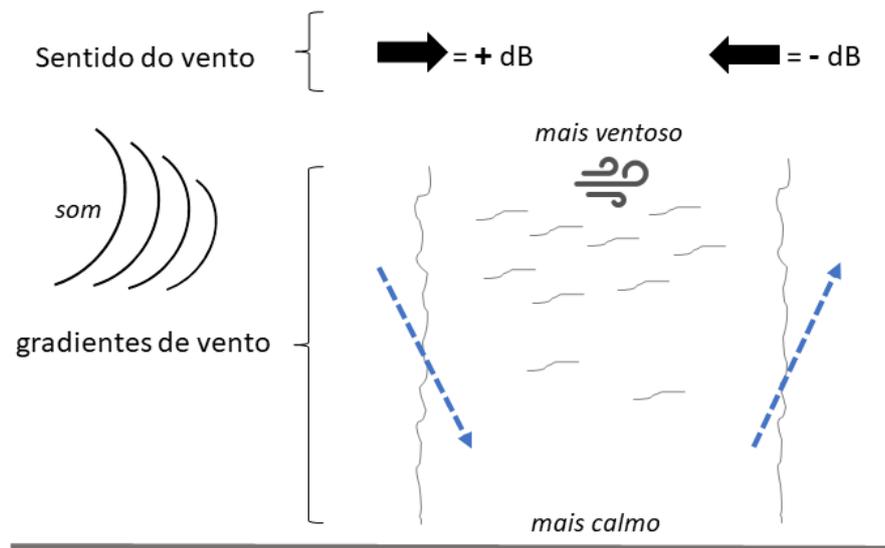


Figura 5. Efeitos do vento sobre o som quando ambos estão em mesma direção. Setas largas e pretas representam o sentido do vento. Setas azuis tracejadas apontam para onde refratam as ondas sonoras conforme sentido do vento. Inspirada em Anderson & Kruze (1992), Wilson *et al.* (2013) e Wahlberg & Larsen (2017).

As consequências das refrações provocadas por gradientes de vento assemelham-se àquelas originadas por gradientes de temperatura. As ondas que refratam para baixo devido ao vento podem refletir muito no solo, o que aumenta os níveis sonoros. Se o vento desvia as ondas para cima, tendem a surgir zonas de sombra ao longo do trajeto de propagação. Nelas, o som é muito atenuado ou até está ausente (Kurze & Anderson 2006, Wilson *et al.* 2013, Attenborough 2014). Experimentos já mostraram que mesmo ventos moderados de 1 a 3 m/s - mas principalmente os fortes de 3 a 5 m/s – podem resultar em efeitos significativos sobre a intensidade do som (Attenborough 2014). Além disso, ventos muito fortes - acima de 5 m/s - causam grande turbulência na estratificação da atmosfera, levando a que o som se espalhe por múltiplas direções (Wilson *et al.* 2013).

Contudo, não é apenas das formas citadas que o vento interfere em uma transmissão sonora. Ele também pode afetar a detecção do som de forma indireta, quando contribui para a produção de ruído. Inclusive, é considerado o principal fator que modifica um ruído de fundo, por vezes aumenta-o em muitos decibéis. Essa amplificação de ruído resulta da interação do vento com aparatos em seu caminho, como a vegetação ou mesmo a própria superfície do microfone gravador (Arrieta *et al.* 1993).

1.2.4. Efeito da vegetação

Árvores e plantas em geral exercem um efeito de barreira às ondas sonoras e podem afetá-las de diversas maneiras, seja causando reflexão, difração ou absorção (Figura 6). Por isso, Wilson *et al.* (2013) equipararam a vegetação a uma turbulência atmosférica em termos de efeito sobre o som, pois ela comporta inúmeros obstáculos que podem redirecionar as ondas sonoras, espalhando-as em várias direções. Porém, esse efeito costuma ser incerto e muito variável: por vezes insignificante, por outras expressivo, mas frequentemente imprevisível. Isso faz com que, não raro, seja excluído das predições referentes à atenuação de excesso (Kurze & Anderson 2006). Por outro lado, há muitos exemplos mostrando a importância da vegetação como fator atenuante do som.

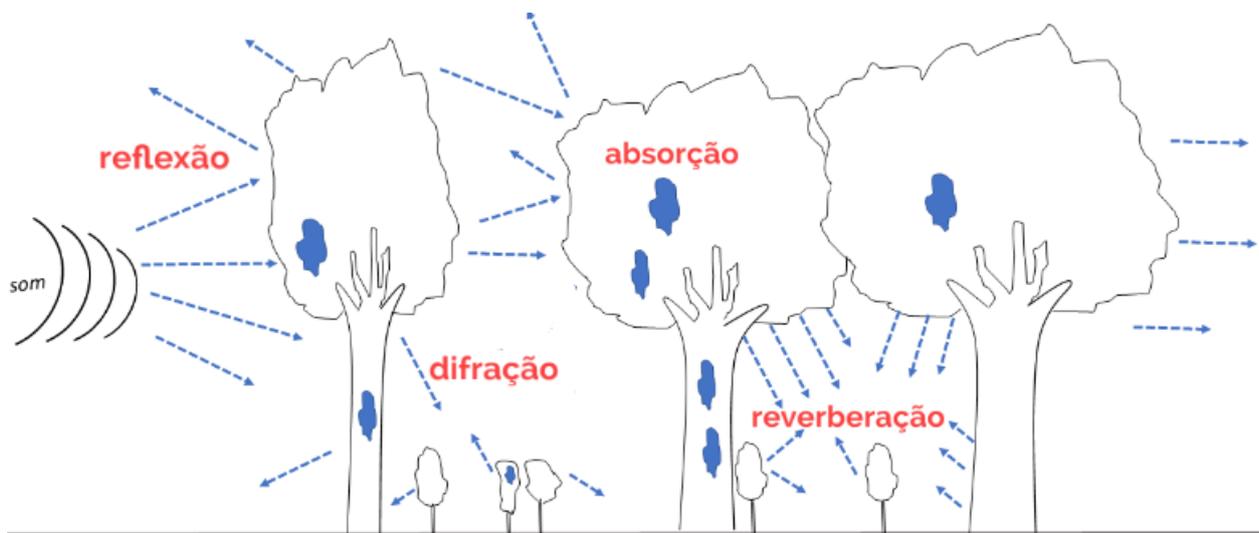


Figura 6. Efeito da vegetação sobre o som. Setas indicam as possíveis direções das ondas sonoras ao incidir sobre uma área vegetada. Inspirada em Anderson & Kruze (1992), Wilson *et al.* (2013), Farina (2014) e Wahlberg & Larsen (2017).

Kurze & Anderson (2006) afirmaram que ruídos de uma rodovia que atingem perpendicularmente uma área de árvores propagam-se por uma distância, no mínimo, dez vezes menor do que quando se propagam por cima dessa área. Não à toa, cinturões de vegetação são muito utilizados como barreiras para reduzir ruídos do tráfego (Kragh 1981, Bucur 2005). Sendo mais específicos, Huisman & Attenborough (1991) mostraram que ondas acima de 1 kHz percorrendo 100 m dentro de florestas de pinos são reverberadas e atenuadas principalmente por múltiplas dispersões entre troncos. Semelhantemente, Aylor (1972) e Price *et al.* (1988) haviam publicado sobre um gradual

aumento da atenuação pela vegetação para frequências que superam 1 kHz. O primeiro autor constatou ainda que as perdas de energia acústica por absorção são proporcionais à densidade da estrutura foliar, enquanto a perda por reverberação depende da largura média das folhas.

Fricke (1984) constatou que frequências de 2 kHz a 8 kHz são atenuadas no interior de florestas em magnitude dependente do tamanho das árvores, do espaçamento entre elas e do tipo de vegetação, cujo efeito é de difícil determinação. Já Tarrero *et al.* (2008) observaram que quanto maior a densidade das árvores ou a dimensão dos troncos, maior será a atenuação de sons de 1 a 4 kHz. Esses resultados corroboram Padgham (2004), que adicionalmente sugeriu que a reverberação é menor em estratos menos densos a 4 m do solo de uma floresta. Por sua vez, Tyagi *et al.* (2013) observaram que frequências de 200 Hz a 12,5 kHz são fortemente atenuadas por vegetações densas com 15 m de profundidade e 2 m de altura. Todavia, aparatos vegetais podem eventualmente causar reflexões de ondas em direção a um receptor, agindo como um fator que melhora a transmissão e alguns sons, como demonstrado por Marten & Marler (1977) e Patriquin *et al.* (2003). Apesar de tudo, por vezes mesmo uma mata sequer influencia a propagação de certas frequências por dezenas de metros (Tarrero *et al.* 2008).

A capacidade de afetar os sons varia de acordo com a fisionomia vegetal e de como seus elementos se dispõem no trajeto da propagação sonora. Em florestas, as características relevantes do ponto de vista acústico incluem as espécies presentes, a densidade de árvores, a área e a espessura foliar, o diâmetro dos troncos, a estrutura geral da mata no plano horizontal, entre outras. A efetividade da interação com um som é coerente com a geometria da estrutura frente ao comprimento de onda. Um som de 1 kHz, por exemplo, propaga-se com comprimento de onda comparável ao diâmetro do tronco de uma árvore de médio porte. Conforme a frequência aumenta, o diminuto comprimento de onda acarreta mais interações do som com os elementos vegetais. Absorções ou reflexões passam a ocorrer em diversos componentes pequenos da flora, outrora irrelevantes para ondas maiores. Assim, o trajeto do som torna-se ainda mais complexo. Logo, uma floresta contém tantos aspectos acusticamente relevantes que se torna virtualmente impossível mensurar todos (Baccur 2005, Tarrero *et al.* 2008).

Mesmo ante uma imensa variabilidade estrutural, algumas generalizações foram propostas a fim de estimar o papel da vegetação no decaimento dos níveis sonoros. De acordo com a normativa ISO 9613-2, a folhagem de árvores e arbustos propicia uma

pequena quantidade de atenuação de excesso, cerca de 3 dB. Porém, isso ocorre apenas se a vegetação é suficientemente densa para bloquear completamente o caminho de propagação do som. O critério utilizado para tanto é que seja impossível enxergar, através dessa folhagem, qualquer objeto posicionado a 3 m do outro lado (ISO 1993b, Baccur 2005, Tyagi *et al.* 2013, mas veja Aylor 1972). No que tange uma generalização do efeito da vegetação conforme frequência sonora, tem-se que sons de mais alta frequência tendem a ser mais atenuados ao atravessar uma área vegetada (Figura 7, Baccur 2005).

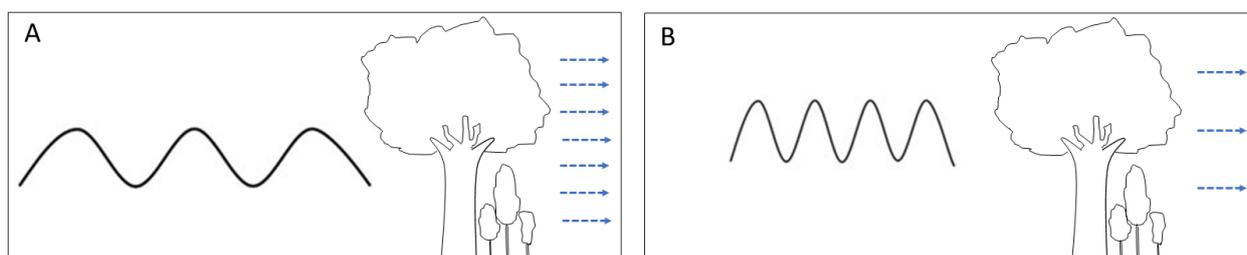


Figura 7. Generalização do efeito da vegetação sobre sons de baixa frequência (A) e alta frequência (B) sonora. Número de setas referem-se à energia acústica resultante após as ondas sonoras atravessarem uma área de vegetação. Adaptada de Farina (2014).

Apesar das generalizações e dos estudos sobre especificidades, há dificuldade em se prever o comportamento de um som transmitido em área de mata. Por exemplo, o modelo de Huisman & Attenborough (1991) foi insuficiente para explicar a forte relação entre altura do gravador e atenuação de sons de 50 Hz a 6 kHz emitidos a 1 m do solo em florestas. A interação entre dispersão de ondas refletidas por troncos e efeito do solo não foi importante, e a absorção dos sons por galhos e folhas finas parece ter explicado as atenuações sofridas pelas frequências mais altas.

Embora por vezes expressa em dB/m, a atenuação de excesso imposta pela vegetação só terá uma relação linear com a distância em ambientes idealmente homogêneos. Todavia, em muitos ambientes reais, a configuração vegetal varia substancialmente ao longo do trajeto de propagação do som. Logo, não há linearidade entre distância e forças que redirecionam as ondas sonoras. Sendo assim, o efeito da vegetação como obstáculo ao som pode tratar-se de uma distorção à perda esperada de 6,02 dB a cada dobro de distância (Morton 1975, Aylor 1972, Marten & Marler 1977, Nemeth & Brumm 2010).

1.2.5. Efeito da direcionalidade do som (efeito do ângulo)

A intensidade de um som apresenta valores máximos na linha reta frontal à sua fonte, ou seja, quando o ângulo entre emissor e receptor é igual a zero. Fora desse eixo, o nível sonoro varia conforme a direcionalidade do som dada por seu emissor. Algumas fontes irradiam energia acústica de maneira aproximadamente uniforme em todas as direções, sendo, por isso, chamadas de omnidirecionais. Na prática, porém, a maioria das fontes de som são direcionais em determinado grau, pois emitem mais ondas em algumas direções do que outras (Figura 8). Quanto mais direcional for o feixe de som, menor será sua intensidade longe do eixo principal de emissão. Sons omnidirecionais também possuem essa variação, mas menos pronunciada (Lang *et al.* 2006, Attenborough 2014, Wahlberg & Larsen 2017).

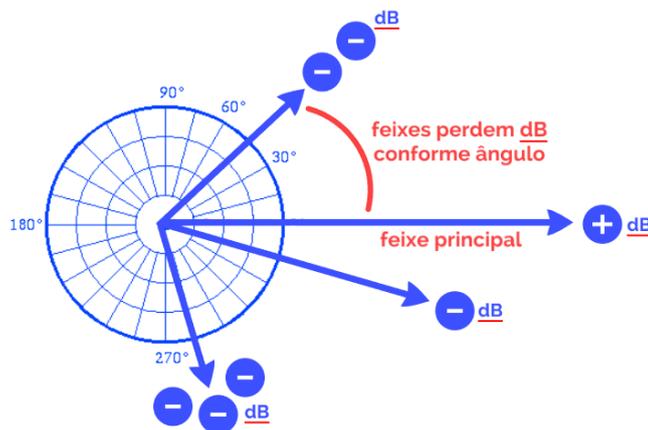


Figura 8. Intensidade de feixes sonoros irradiados a partir de uma fonte direcional. Inspirada em Wahlberg & Larsen (2017).

A respeito de como emissor e receptor se dispõem, o efeito da direcionalidade independe da distância entre eles, pois a direcionalidade é função apenas da posição angular do receptor ao redor do centro acústico da fonte. Portanto, se em um ângulo de detecção ocorre uma perda de 3 dB maior do que em outro, essa diferença entre ângulos permanece exatamente a mesma a qualquer distância da fonte. No entanto, para isso ser verdade, é preciso que se considere a propagação em um ambiente totalmente aberto, livre de interferências (Lang *et al.* 2006). Ademais, há uma certa relação entre frequência do som e direcionalidade. Quando emitem frequências sonoras baixas, todas as fontes geralmente comportam-se como sendo omnidirecionais, ou próximas disso. Porém, conforme a frequência aumenta, a mesma fonte tende a emití-lo com maior direcionalidade (Lang *et al.* 2006, Kuttruff 2007).

1.2.6. Efeito do ruído sonoro de fundo

Apesar das inúmeras definições em Acústica, um ruído é simplesmente qualquer sinal indesejado, o qual compete com a informação sonora que se deseja obter. Em vista disso, o ruído sonoro de fundo refere-se a toda fonte acústica que interfere com a produção, transmissão ou detecção de um determinado som. É composto pelo conjunto de ruídos presentes no momento e no local da propagação sonora, sejam ruídos antrópicos ou naturais (Kuttruff 2007, Hartmann & Candy 2014).

Os ruídos antrópicos advêm de qualquer atividade humana ou maquinário, incluindo o próprio instrumento gravador dos sons. E mesmo que o local de gravação seja relativamente silencioso, com poucos distúrbios desse tipo, as medidas do som visado são quase sempre influenciadas por fontes naturais de ruído. Estas fontes podem ser corpos d'água, ventos incidindo sobre a vegetação, animais não-alvo, entre outros típicos da natureza. Origem à parte, na prática, o ruído de fundo de um ambiente corresponde a todo registro sonoro gravado quando não há nenhum som de interesse sendo emitido (Arrieta *et al.* 1993, Ohlund & Larsson 2015).

Quanto à sua composição, um ruído geralmente constitui-se de várias frequências desarmônicas. Embora, não raro, seja possível verificar alguma faixa de frequência mais intensa do que as outras no espectrograma representativo de um ruído (Fernandes 2002). Independente disso, o ruído de fundo costuma ser expresso pela intensidade de cada frequência que o compõe. Essa intensidade dificilmente é constante, sendo comuns flutuações temporais mais ou menos pronunciadas de certas frequências. Isso decorre por causa de fontes de ruído temporárias e pode demarcar, por exemplo, padrões distintos de atividades diurnas e noturnas (Kuttruff 2007).

Seja qual for o ruído de fundo, o efeito sobre um som de interesse é justamente o de mascarar-lo quando ambos se aproximam do mesmo nível de pressão. Essa condição torna o som indetectável. Em virtude disso, em todo estudo acústico ao ar livre, é fundamental saber a intensidade do ruído para a mesma frequência do som alvo, a fim de distingui-los e assim estabelecer o limite da detecção. Comumente, para que um som seja detectado, tem-se como parâmetro a diferença mínima de 4 dB entre esse som e o ruído de frequência equivalente. Portanto, para que se saiba quantos decibéis um som deve perder antes de se extinguir, o valor de sua amplitude inicial deve ser subtraído do valor da amplitude do ruído menos quatro (Marten & Marler 1977, Langemann & Klump 2005, Ohlund & Larsson 2015).

1.3. Bioacústica e seu uso para monitorar vertebrados terrestres

A Bioacústica corresponde ao estudo dos sons produzidos por animais e todos aspectos afins, incluindo as propriedades das ondas emitidas pelas vocalizações e os efeitos ambientais a que se submetem. A partir de seu efetivo desenvolvimento na década de 1950, grandes avanços tecnológicos levando à portabilidade e à autonomia dos equipamentos, assim como à capacidade de armazenamento, têm aumentado muito a aplicabilidade da Bioacústica (Blumstein *et al.* 2011, Stowell 2017).

Em ambientes terrestres, expande-se o uso de amostragens acústicas passivas (AAPs), assim designadas em oposição à forma ativa que utiliza sonares para localizar alvos (Marques *et al.* 2012). As AAPs empregam gravadores autônomos de som e têm sido muito úteis para o estudo de insetos (Eliopoulos *et al.* 2016, Njoroge *et al.* 2017), répteis (Noda *et al.* 2017, Baeckens *et al.* 2019), mamíferos em geral (Thompson *et al.* 2010, Liu *et al.* 2016), mas principalmente anuros (Xie *et al.* 2015, Waddle *et al.* 2009,) aves (Shonfield & Bayne 2017, Darras *et al.* 2019) e morcegos (Britzke *et al.* 2011, Arias-Aguilar *et al.* 2018). Muitas vezes, o método acústico revela-se mais eficaz para o registro desses vertebrados do que técnicas convencionais, já que grandes volumes de dados podem ser coletados de forma autônoma, não-invasiva e sem evidente viés humano (Acevedo & Villanueva-Rivera 2006, Pavan 2008, Obrist *et al.* 2010, Blumstein *et al.* 2011, Xie *et al.* 2015, Stowell 2017).

De fato, AAPs tem potencial para garantir excelentes estimativas de riqueza de anuros, aves e morcegos porque suas espécies exibem propriedades sonoras bem distintas e, portanto, úteis para uma identificação taxonômica. Além disso, algoritmos para o reconhecimento automático de táxons em espectrogramas têm sido desenvolvidos recentemente, vide uso de *softwares* como Song Scope (Waddle *et al.* 2009), Avisoft SASLab Pro (Specht 2017) e XBAT (Figueroa & Robbins 2008). Embora esses *softwares* ainda careçam de ajustes e padronizações, a expansão dos bancos de dados acústicos de aves e morcegos - resultantes do crescente uso de AAPs - tendem a reduzir eventuais erros. Já há casos em que a resolução é tanta que se torna possível discriminar indivíduos e apontar sexo, idade, população a que pertence, entre outros aspectos (Brandes 2005, Frommolt *et al.* 2008, Obrist *et al.* 2010, Blumstein *et al.* 2011).

Devido à tamanha capacidade, AAPs podem representar uma ferramenta imprescindível para descobrir espécies crípticas, noturnas, raras, ameaçadas de extinção ou habitantes de locais onde outras formas de registro são inviáveis (Obrist *et*

al 2010, Blumstein *et al.* 2011, Ganchev 2017). Anuros, aves e morcegos de florestas densas enquadram-se nessa última categoria (vide Blumstein *et al.* 2011). Além disso, gravadores acústicos autônomos também são úteis para o estudo da paisagem sonora, a qual se refere ao conjunto de sons bióticos e abióticos que caracteriza um determinado ambiente. Esse tipo de análise é importante para avaliar a biodiversidade acústica de toda a fauna local e para compreender como seus sons competem entre si e com os ruídos ambientais de fundo. Dessa forma, pode-se inclusive monitorar a qualidade de um ecossistema frente a impactos antrópicos (Pavan 2008, Blumstein *et al.* 2011).

Ademais, dependendo da espécie, um estudo bioacústico é capaz de associar cada vocalização a interações ecológicas, incluindo defesa de território, repulsão de predadores, coesão de grupo, atração de parceiros sexuais e – no caso específico de morcegos - orientação espacial, busca e captura de alimento. Assim, por meio de AAPs, tem-se também um poderoso recurso para constatar variações fenológicas e entender a dinâmica social de populações e comunidades (Obrist *et al.* 2010, Blumstein *et al.* 2011, Ganchev 2017). Por consequência, emerge o emprego desse método para monitorar o comportamento de espécies ameaçadas. Nesse âmbito, Teixeira *et al.* (2019) conceituaram o estudo do comportamento acústico para conservação. O termo refere-se à análise da variação de vocalizações como um indicador do status de animais em risco. Portanto, sons gravados podem revelar também aspectos fundamentais à tomada de decisões sobre o manejo de fauna (Laiolo 2010, Teixeira *et al.* 2019).

Independente da finalidade de uma AAP em ambiente terrestre, a distância máxima abrangida pelo método raramente é assegurada. Recentemente, a fim de desvendá-la, tem-se usado conjuntos de gravadores arranjados de forma a apontar, via algoritmos, a posição geográfica absoluta da fonte sonora. Somente por meio desse rastreamento, provem-se dados detalhados sobre direção do sinal detectado, dinâmicas territoriais, uso do habitat, abundância e densidade populacional. Todavia, a maioria das amostragens de sons de anuros, aves e morcegos faz uso de um único gravador por local, por ser um método mais acessível e viável logisticamente (Efford *et al.* 2009, Blumstein *et al.* 2011, Teixeira *et al.* 2019). Logo, descobrir o que define o alcance de detecção de uma AAP para cada onda sonora espécie-específica segue sendo um desafio na área da Bioacústica (Darras *et al.* 2016, Yip *et al.* 2017).

1.4. Os sons emitidos por anuros

Na maioria das espécies da ordem Anura, os indivíduos têm estruturas vocais bem desenvolvidas capazes de produzir uma variedade de sons que servem para atrair parceiros, defender territórios ou expressar estresse (Duellman & Trueb 1994, Schwartz & Bee 2013). Em muitos casos, a vocalização representa a atividade de maior custo energético da espécie (Prestwich 1994). A taxa metabólica de um anfíbio anuro vocalizando pode exceder o seu estado de repouso em 110% a 220% (Prestwich *et al.* 1989, Wells & Taigen 1989)

Anuros tipicamente produzem chamados por contração muscular da parede do corpo, forçando a passagem do ar dos pulmões pela laringe até as cordas vocais, cavidade bucal e saco vocal (Narins & Feng 2007). A frequência fundamental emitida advém da vibração das cordas vocais, com valor dependente da massa, comprimento e tensão dessas cordas (Martin 1972). O saco vocal irradia as ondas sonoras, podendo amplificar o som gerado e definir sua direcionalidade (Duellman & Trueb 1994). Esses mecanismos geram características sonoras espécie-específicas (Martin & Gans 1972).

Embora algumas fêmeas de anuros vocalizem visando o acasalamento, essa atividade é muito mais comum em machos, que vocalizam constantemente durante a fase reprodutiva para atrair parceiras férteis (Schwartz & Bee 2013). Machos de espécies cujas estações reprodutivas são duradouras também podem emitir chamados de defesa territorial. Nesse caso, um macho residente responde à vocalização de um outro que se aproxima. Já os chamados de estresse são comuns tanto em fêmeas quanto em machos frente a perturbações (Duellman & Trueb 1994).

Muitos chamados de anuros possuem picos de amplitude que excedem 90 dB de pressão sonora a uma distância de 1 m (Gerhardt 1975, Littlejohn 1977). Todavia, há uma significativa variação intraespecífica em amplitude de chamados, e fêmeas tipicamente escolhem o mais alto entre dois chamados. Alguns estudos mostraram pouca correlação entre amplitude e tamanho corporal (Gerhardt 1975, 1994), enquanto outros apontaram para uma correlação positiva entre ambos parâmetros em Anura (Littlejohn 1977, Given 1987)

A despeito da amplitude sonora, existe uma forte correlação entre frequência dominante e tamanho corpóreo do indivíduo em Anura, o que faz com que espécies muito pequenas emitam ondas de menor comprimento e, portanto, maior frequência (Martin 1972, Giacoma & Castellano 2001) - conforme tendência observada para outros animais

(Bowling *et al.* 2017). A frequência dos sons de anuros costuma ficar entre 1 kHz e 4 kHz (Loftus-Hills & Johnstone 1970, Duellman & Trueb 1994) ou entre cerca de 100 Hz a 6 kHz (Capranica 1976, Fay & Simmons 1999). Contudo, há casos extremos de pequenas pererecas emitindo ultrassons (Narins *et al.* 2004, Feng *et al.* 2006).

Um habitat ruidoso pode atuar sobre a seleção de frequências mais altas concomitantemente ao efeito exercido por uma menor dimensão do corpo (Boonman & Kurniati 2011, Vargas-Salinas & Amézquita 2014). A seleção sexual é outro fator que interfere diretamente na frequência utilizada, já que as fêmeas são receptivas apenas a determinadas frequências sonoras de seus pares (Gerhardt 1994). Assim, em um único coro - muitas vezes formado por mais de uma dezena de espécies - é grande a variação espectral dos chamados emitidos. Isso é importante para evitar interferências mútuas dentro da mesma assembleia e para reduzir a chance de acasalamentos heteroespecíficos (Wells & Schwartz 2007).

Diferenças sonoras em frequência dentro da mesma comunidade são consistentes com a noção de que espécies de anuros repartem nichos acústicos. Essa partição pode surgir como resultado de ajustes sonoros divergentes entre táxons simpátricos ao longo do tempo. Alternativamente, o fenômeno pode advir da formação seletiva de assembleias, haja vista uma maior probabilidade de agrupamento entre anuros que emitem ondas que não se sobrepõem (Chek *et al.* 2003). Por vezes, esse mesmo processo leva a divergências na frequência emitida por indivíduos da mesma espécie ao longo da sua distribuição geográfica (Lougheed *et al.* 2006).

Contudo, os diferentes chamados são geralmente produzidos em momentos distintos para aumentar a probabilidade de serem detectados, reduzindo a interferência (Wells & Schwartz 2007). Outra forma de um anuro melhorar a propagação das suas ondas dentro de um ambiente ruidoso é repetindo os elementos mais intensos de seu som. Muitas espécies apresentam chamados redundantes, com alta taxa de repetição da frequência de maior energia (Schwartz & Bee 2013).

Raros são os indivíduos que conseguem elevar a intensidade de seus sons para superar o limiar da pressão sonora de fortes ruídos de fundo (Schwartz & Bee 2013). Porém, um padrão modulado de atividade vocal em conjunto, por vezes referido como “um forte cantar uníssono”, faz com que machos de mesma espécie amplifiquem seus chamados e os emitam por mais tempo continuamente. Desse modo, é possível superar as restrições energéticas que podem limitar a duração das vocalizações por noite (Schwartz 1991).

1.5. Os sons emitidos por aves

Todas as espécies de aves produzem sons, os quais apresentam uma ampla diversidade em estrutura e servem para mediar um número crucial de interações sociais. Esse variável repertório sonoro é tipicamente classificado em duas categorias: cantos e chamados. Cantos são de caráter multi-harmônico, geralmente com elevada amplitude sonora. Ao contrário, chamados são estruturalmente mais curtos e simples, muitas vezes compreendendo tons de única frequência (Altrom & Ranft 2003, Fagerlund 2004, Brumm & Zollinger 2013).

A vocalização por cantos está restrita à ordem Passeriformes, mais especificamente à subordem Passeri, a qual engloba cerca de metade das espécies de aves. Os indivíduos desse clado possuem músculos vocais capazes de emitir complexos cantos com rápida modulação de frequência (Stowell 2017). Entretanto, ao passo que alguns apresentam um amplo repertório sonoro, outros cantam através de sequências que pouco diferem (Fagerlund 2004). Seja como for, as duas principais funções de um canto são defesa do território e atração de parceiros. Estima-se que as pressões evolutivas inerentes a tais atividades ocasionaram a enorme diversidade desse tipo de vocalização (Brumm & Zollinger 2013).

Em certas aves, o canto para atração sexual é mais duradouro e complexo do que o utilizado para repulsar competidores. De qualquer forma, cantar é uma atividade muito mais comum em machos. Quando ocorre em fêmeas, tendem a ter estrutura mais simples. Quanto à periodicidade, há espécies que emitem cantos o ano todo, e outras que o fazem apenas na época reprodutiva da primavera. Invariavelmente, aves cantam mais ativamente ao amanhecer. Entre as razões para isso, pode-se apontar as melhores condições para transmissão do som nesse período, quando ainda não se formaram gradientes atmosféricos de temperatura que interferem na propagação das suas ondas sonoras a longas distâncias (Fagerlund 2004, Dooling & Prior 2017).

Os chamados de aves também variam bastante entre as espécies. Esses sons são emitidos ao longo de todo o ano por indivíduos de ambos os sexos de qualquer táxon, embora os passeriformes tenham um repertório maior. Seu uso ocorre em contextos particulares que podem estar relacionados a específicas funções, como anúncio de alimento, coesão do grupo social e alerta contra predadores. Contudo, enquanto algumas espécies emitem uma variedade de chamados ou mais de um tipo

para a mesma função, outras utilizam sons muito similares para fins distintos (Fagerlund 2004, Brumm & Zollinger 2013).

Cantos e chamados apresentam a frequência de maior energia principalmente entre 1 e 5 kHz, com limite máximo em torno de 10 kHz (Beason 2014, Dooling & Prior 2017). Todavia, há ocorrências de valores divergentes a esses, com extremos abaixo de 1 kHz e acima de 15 kHz (Beason 2014), incluindo casos de ultrassons (Brizio 2015). De forma geral, o tamanho corporal está correlacionado negativamente com essa grandeza sonora: aves menores produzem frequências mais altas (Martin *et al.* 2011). Essa correlação é explicada pela capacidade vibratória da membrana da siringe - o órgão vocal das aves -, a qual pode produzir altas frequências apenas em pequenos aparatos (Farina 2014).

Há também uma certa correspondência entre características do ambiente e frequência emitida por aves. Pressões seletivas promovem que vocalizações típicas de um local ocorram nas frequências que sofrem menor atenuação ali. Por esse motivo, geralmente os sons de aves de floresta são semelhantes a tons puros de frequência constante e mais baixa em comparação com aves de área aberta (Morton 1975, Marten & Marler 1977, Ey & Fischer 2009). As condições atmosféricas mais estáveis do interior de matas permitem que a ave concentre sua energia sonora em uma banda curta de frequência (Morton 1975). Mesmo para espécies que emitem sons mais complexos é comum a repetição somente das frequências mais intensas como forma de aumentar a detectabilidade (Prince 2013). Mas apesar da pressão seletiva em comum, a diversidade de nichos acústicos pode ser notável em assembleias de aves. Espécies de um mesmo local costumam vocalizar em frequências que as diferem, a fim de evitar superposições destrutivas de onda (Brumm & Zollinger 2013, Goodwin & Podos 2013).

Em relação à amplitude das ondas sonoras da avifauna, seus valores variam consideravelmente. Algumas vocalizações podem ser ouvidas a mais de um quilômetro de distância (Frommolt *et al.* 2008), enquanto outras são pouco perceptíveis mesmo perto do indivíduo que a emitiu (Ritschard 2012). Embora haja carência de estudos sobre a exata amplitude vocal de muitas aves (Ritschard 2012), existem importantes trabalhos que mensuraram esse parâmetro para certos táxons (Brumm & Hultsch 2001, Zollinger & Brumm 2015, Dorado-Correa *et al.* 2017). Sabe-se assim que o cricrió *Lipaugus vociferans* provavelmente esteja entre as aves com o som mais intenso, de 111,5 dB a 1 m (Nemeth 2004). Já Brumm (2004) e Yip *et al.* (2017) acreditam que as mais altas amplitudes emitidas pela maioria das aves fiquem em torno de 90 dB a 1 m.

1.6. Os sons emitidos por morcegos

Diferentemente dos anuros e das aves, a maior parte do repertório vocal de morcegos é composto por ultrassons. Logo, para estudar os sons desses mamíferos voadores, fez-se necessário um crescente desenvolvimento de aparelhos capazes de gravar ondas de alta frequência. De fato, o avanço tecnológico da Bioacústica tem revolucionado o estudo de Chiroptera nas últimas décadas, mais do que qualquer outra, visto ser difícil a captura ou a visualização de muitas das suas espécies. Em virtude disso, os sons de quirópteros destacam-se como os mais visados por AAPs dentre as vocalizações de mamíferos terrestres (Matos *et al.* 2003, Britzke *et al.* 2013).

Assim como os demais animais que vocalizam, morcegos emitem sinais sonoros para fins de comunicação, seja para atrair parceiros, marcar território ou anunciar estresse. Tais vocalizações são as únicas do seu repertório que tendem a incluir frequências na gama audível, por vezes em torno de 10 kHz (Gillam & Fenton 2016). Já os principais sons usados por morcegos tendem a apresentar frequência superior a 20 kHz e lhes concedem um peculiar sistema de percepção ambiental. Essa capacidade, denominada de ecolocalização, consiste em emitir sons e analisar os ecos que retornam a fim de detectar, caracterizar e localizar elementos refletores. Aproximadamente 80% das espécies de morcegos fazem uso desse sistema para se orientar no espaço ou para encontrar e capturar itens de sua dieta no escuro (Simmons & Stein 1980, Schnitzler *et al.* 2003). Das 18 famílias de Chiroptera viventes, apenas Pteropodidae apresenta membros que não ecolocalizam, os quais estão restritos a regiões da Ásia, África e Oceania (Mickleburgh *et al.* 1992, Walters *et al.* 2013).

Apesar de ecolocalizar, a família Phyllostomidae - onde estão morcegos frugívoros, nectarívoros, hematófagos, carnívoros - raramente é gravada por detectores de ultrassom. Isso provavelmente se deve à forte direcionalidade dos seus sons, propiciada por sua peculiar folha nasal. Assim, os morcegos alvos de AAPs, particularmente na região Neotropical, são os pertencentes a famílias de hábito majoritariamente insetívoro: Molossidae, Vespertilionidae, Emballonuridae, Noctilionidae (que inclui uma espécie exclusivamente piscívora), entre outras (Marques & Fabián 2010, Barros *et al.* 2014, Aguilar *et al.* 2018). Esses quirópteros representam cerca de 70% de todas as espécies no mundo, mas dificilmente são capturados em rede neblina, o que reforça a importância da Bioacústica. Seus sons variam em frequência conforme a espécie, de 20 kHz a 120 kHz principalmente (Denzinger & Schnitzler 2013, Denzinger *et al.* 2016), embora se saiba que a totalidade dos possíveis sinais emitidos por morcegos

abrange uma faixa de pelo menos 9 kHz a 216 kHz (Walters *et al.* 2013). Já a intensidade sonora das suas ecolocalizações costuma ficar entre 90 dB e 120 dB a 1 m do indivíduo emissor (Luo *et al.* 2014, Denzinger *et al.* 2016).

A respeito da finalidade, os sons de ecolocalização são classificados em sinais de busca por alimento (também utilizados para orientação espacial) e sinais de aproximação a esse alimento. Ambos são passíveis de gravação, mas obviamente o primeiro tipo é o mais provável de ser gravado. É justamente esse sinal que tende a apresentar variação espécie-específica tão fundamental para uma identificação taxonômica. Sinais de aproximação variam menos de uma espécie para outra, sendo sempre caracterizados por elevada taxa de emissão, alta direcionalidade e, principalmente, por pulsos de frequência modulada com acentuado decaimento. Já os sinais de busca pela presa podem ser de banda larga, curta ou mesmo de frequência constante, com harmônicas ou não. Há também grande variabilidade na duração e no intervalo entre pulsos (Griffin *et al.* 1960, Murray *et al.* 2001, Denzinger *et al.* 2016).

Existe uma forte relação entre a frequência do sinal de busca e o local em que fora emitido, muito mais forte do que aquela que ocorre entre aves e seus ambientes. Isso está intrínseco ao modo de forrageio e à maior atenuação das ondas de alta frequência, seja por absorção atmosférica ou por efeitos de barreira. Além de enfrentar esses empecilhos à propagação de seus sons, os morcegos precisam evitar superposições entre ondas emitidas e refletidas. Ecos de elementos adjacentes, como vegetação ou superfície d'água, também podem confundir os no reconhecimento de seus alvos (Schnitzler & Kalko 1998, Denzinger & Schnitzler 2013).

Enquanto chamados de frequência modulada possibilitam que o morcego receba uma grande quantidade de informação a respeito dos obstáculos próximos a ele, chamados de frequência constante maximizam a detecção de alvos distantes (Lattenkamp *et al.* 2018). Ademais, o comprimento de onda de uma ecolocalização deve ser de magnitude semelhante ao tamanho do alvo. Portanto, quirópteros que caçam insetos grandes precisam usar frequências menores do que aquelas emitidas por caçadores de presas pequenas (Simmons & Stein 1980, Kober & Schnitzler 1990, Denzinger & Schnitzler 2013). Haja vista tantos fatores condicionantes à ecolocalização, a diversidade acústica da ordem Chiroptera é enorme e muito útil para AAPs. Só no Brasil, 65 espécies de morcegos já têm seus sons descritos e catalogados para devidas identificações (Aguilar *et al.* 2018).

1.7. Detectabilidade de vertebrados terrestres em AAP

Qualquer AAP tem que lidar com as limitações inerentes ao registro dos sons. Apesar dos avanços tecnológicos, a detecção de um som na natureza não é um processo simples e pode resultar em erros, visto os diversos efeitos ambientais sobre o som que podem somar-se à sua dispersão geométrica. Isso faz com que a detectabilidade de uma vocalização esteja em função das propriedades de suas ondas, bem como das condições do ambiente pelo qual se propagam (Pettersson 2004, Obrist *et al.* 2010, Britzke *et al.* 2013). Inclusive a variação ambiental dentro de um mesmo habitat - como diferenças de densidade vegetal entre pontos - pode alterar os resultados de um estudo bioacústico (Fischer *et al.* 2009, Britzke *et al.* 2013).

A expansão de estudos abordando a detectabilidade de vertebrados terrestres pela distância máxima de detecção dos seus sons é recente (Darras *et al.* 2016, Yip *et al.* 2017). Todavia, na década de 1970, experimentos com sons sintéticos de únicas frequências foram fundamentais para os trabalhos que vieram a seguir sobre a comunicação em aves. Morton (1975) pôde constatar que as frequências menos atenuadas nas florestas analisadas eram justamente àquelas utilizadas pelas aves habitantes. De forma similar, Marten & Marler (1977) verificaram que há diferença na propagação dos sons de aves entre campos e florestas, mas que a altura de emissão e a frequência sonora exercem maior influência do que o tipo habitat. Segundo seu estudo, sons emitidos a partir de 2 a 10 m do solo tiveram um alcance maior do que quando emitidos a 0,15 m e 1 m, o qual geralmente reduzia com o aumento da frequência.

Ambos trabalhos clássicos de Morton (1975) e Marten & Marler (1977) propuseram uma equação semelhante para se chegar à distância máxima de comunicação entre dois animais (D_{mc}), sendo um a fonte sonora e outro o receptor. Para tanto, eles consideraram dispersão geométrica, atenuação de excesso, ruído de fundo e amplitude inicial como dados empíricos, e essa distância máxima como a incógnita a ser descoberta. A Equação 1.13 sintetiza a ideia original de Morton (1975) e Marten & Marler (1977), mas adaptada por outros autores como Lohr *et al.* (2003), Nemeth & Brumm (2010) e Parris & MacCarthy (2013). O termo à direita da igualdade, Nl_o-R-L , representa o total de decibéis que o som tem a perder antes de se tornar indetectável. Já a expressão à esquerda, $AEx(D_{mc}-D_o)$, assume a simplificação de que a atenuação de excesso é a mesma ao longo de todo o caminho de propagação do som, tendo a distância inicial (D_o) como referência.

$$20 \times \log_{10} \left(\frac{D_{mc}}{D_o} \right) + AE \times (D_{mc} - D_o) = NI_o - R - L \quad (1.13)$$

Onde:

D_{mc} = distância máxima de comunicação (m)

D_o = distância inicial da medida do nível sonoro (m)

AE = atenuação de excesso (dB/m)

NI_o = nível de intensidade sonora na distância inicial (dB)

R = nível do ruído sonoro de fundo correspondente à mesma frequência do som (dB)

L = limite de detecção do som em relação à diferença de seu nível com o do ruído (dB)

$NI_o - R - L$ = total de nível de intensidade a perder antes de o som se extinguir (dB)

Baseado em Marten & Marler (1977), Brenowitz (1982) definiu claramente o conceito de espaço ativo. Trata-se da distância, a partir da fonte, na qual a amplitude do som emitido atinge o limite auditivo mínimo de potenciais receptores. Ele explicou que o valor indica uma medida linear da distância máxima de comunicação do sinal sonoro e equivale ao raio de um efetivo volume de ar abrangido pelo som. A seguir, o autor calculou o espaço ativo de um canto cuja frequência central era 4 kHz, constatando que variava de 118 m a 200 m conforme ruído de fundo, velocidade e direção do vento. Desde então, muitos trabalhos passaram a utilizar o conceito e o cálculo do espaço ativo para certos táxons, também apontando os principais fatores para as variações observadas (Lohr *et al.* 2003, Blumenrath & Dabelsteen 2004, Jensen *et al.* 2008, Nemeth & Brumm 2010, Gall *et al.* 2012, Parris & MacCarthy 2013, Mouterde *et al.* 2014). A maioria deles pôde afirmar que o alcance de uma vocalização é limitado essencialmente pela frequência sonora espécie-específica, pela densidade vegetal do ambiente e pela intensidade do ruído de fundo. Quanto maior o valor de tais fatores, menor a distância atingida pelo som.

Referindo-o como sinônimo de espaço ativo, Obrist *et al.* (2010) e Llusia *et al.* (2011) cunharam o termo espaço de detecção. Porém, este foi tratado no âmbito das AAPs como sendo a área ao redor do gravador onde os sons das espécies de interesse podem ser registrados e identificados. Fazendo uso desse conceito, Darras *et al.* (2016) propuseram um método empírico para estimar o espaço de detecção de um som: emitir tons puros representativos de cada animal alvo na sua típica altura de emissão, e então

medir a variação da intensidade sonora a cada dobro de distância. Em seguida, sugeriram calcular a distância de transmissão do som por regressão linear, considerando o decaimento linear do nível sonoro com o logaritmo da distância. Desse modo, mensuraram o espaço de detecção de sons sintéticos de 0,05 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz, 12 kHz, 16 kHz e 40 kHz emitidos em três alturas em 38 locais, entre florestas nativas e plantações, onde diversos parâmetros vegetais foram aferidos. Apesar da variabilidade encontrada, os autores concluíram que nenhum dos fatores mensurados seria um bom preditor do espaço de detecção. Defenderam então ser indispensável uma medida direta da transmissão sonora pelo método empírico proposto em cada ponto amostral.

Considerando métodos empíricos e recentes para estimar a detectabilidade de anuros ou aves em AAPS, ressalta-se também o trabalho de Yip *et al.* (2017). Seus experimentos incluíram a emissão de tons puros de única frequência - de 1 kHz a 8 kHz - e tentativas de gravação em várias transecções com até 1312 m dentro de mata e área aberta. A umidade, muito correlacionada à temperatura, influenciou positivamente a detectabilidade de quase todos os sons. Ao contrário, o aumento da frequência e as matas mais densas reduziram o raio de detecção. Já a ocorrência de ventos ora aumentou esse raio ora o reduziu, o que os autores atribuíram a diferentes direções do vento, não mensuradas. Nesse estudo, concluiu-se também que variar a amplitude inicial dos sons foi desnecessário: o que importa para estimar a detecção de um som é a diferença de amplitude entre um ponto e outro, cujo padrão pode ser aferido por transecções menores.

No que tange exclusivamente a detectabilidade acústica de morcegos, Parsons (1996) foi um dos pioneiros ao mostrar que a distância máxima de detecção de tons puros de 40 kHz era maior em áreas abertas do que fechadas. Similarmente, Weller & Zabel (2002) afirmaram que o número de detecções de morcegos é 24% a 44% maior quando o microfone gravador é direcionado a locais com menos árvores, independente do seu ângulo de inclinação. Em contrapartida, Patriquin *et al.* (2003) averiguaram que a detectabilidade de tons puros de 40 kHz não varia conforme a densidade da floresta. Verificaram ainda que o tom de 25 kHz foi mais detectado em mata fechada do que em área aberta, talvez por ter sido refletido para baixo pelos aparatos do dossel, segundo eles. Por fim, concluíram que a influência da vegetação na transmissão de ultrassons é difícil de ser interpretada e requer muito mais estudos.

Na atual década, cresceu o número de estudos investigando o que afeta o alcance das ecolocalizações. Stiliz e Schnitzler (2012) mostraram que a distância máxima

de percepção de ambientes por ecolocalizações varia muito - de 2,4 m a 68,6 m -, sendo predominantemente limitada pela atenuação atmosférica. Por sua vez, Luo *et al.* (2014), usando dados atuais do clima, projetaram o efeito da elevação da temperatura global sobre a eficácia do forrageio de quirópteros. Eles verificaram que espécies com sons acima de certa frequência limítrofe – cujo valor depende da zona climática -, perderão volume de detecção de presas. De modo similar, Goerlitz (2018) calculou a atenuação atmosférica para todas as frequências de 10 kHz a 110 kHz frente às possíveis variações meteorológicas sob as quais morcegos se submetem. Assim, foi outro autor a sobressaltar o forte efeito que esse fator tem sobre a propagação dos ultrassons, principalmente na restrição do alcance das ecolocalizações de maior frequência sonora.

Entre os estudos voltados a testar o alcance das AAPs para morcegos, destaca-se o de Adams *et al.* (2012). Eles testaram a detecção de sons sintéticos de 25 kHz, 55 kHz, 85 kHz e 115 kHz por diferentes gravadores a cada 5 m da fonte até 40 m, variando o ângulo entre emissor e gravador em 0°, 45° e 90°. A seguir, calcularam a distância máxima de detecção com base em regressão logística, determinando-a como a distância além da qual havia menos de 50% de probabilidade de detectar um sinal. Seus resultados mostraram que apenas o sinal de 25 kHz foi detectado nas maiores distâncias amostradas. O som de 115 kHz foi detectado só uma vez e apenas na distância de 5 m, enquanto o som de 85 kHz nunca passou de 10 m, e o de 55 kHz variou de 7 m a 16 m de distância máxima em 0°. Os autores também constataram que, de forma geral, quanto maior o ângulo entre emissor e gravador, menor o número de detecções.

Apesar das importantes contribuições já dadas, ainda há muito para elucidar sobre a detectabilidade das diferentes ondas sonoras de vertebrados terrestres ou sobre a que distância estaria um indivíduo que teve seu som gravado (Marques *et al.* 2012). Em geral, a distância máxima que os sons desses animais podem alcançar e os fatores ambientais que a limitam seguem sendo pouco considerados em AAPs (Britzke *et al.* 2013, Darras *et al.* 2016, Yip *et al.* 2017). Porém, visto essa medida equivaler ao raio de um espaço esférico de detecção, um aumento de 10% nela pode representar 33% a mais em volume de ar amostrado por um gravador (Patriquin *et al.* 2003, Skowronski & Fenton 2008).

De fato, espécies igualmente abundantes no mesmo local podem ter probabilidades bem diferentes de detecção de seus sons. Sem essa estimativa torna-se complicado aferir dados ecológicos como riqueza, densidade, abundância, atividade ou ocupação (Obrist *et al.* 2010, Britzke *et al.* 2013, Darras *et al.* 2016). Inclusive, modelos

de ocupação devem considerar a detecção imperfeita (Mackenzie *et al.* 2002, Pellet & Schmidt 2005, Guimarães *et al.* 2014) e, portanto, fazer uso de valores que representem a detectabilidade divergente aos táxons visados pelo gravador autônomo. Ademais, a abstração da distância máxima de detecção inviabiliza comparações entre AAPs realizadas em distintos contextos ambientais. Sobretudo, seu conhecimento prévio é de extrema relevância para um desenho amostral, pois indica o número e a disposição de estações necessárias para monitorar com sucesso um determinado habitat ou população (Obrist *et al.* 2010, Britzke *et al.* 2013, Darras *et al.* 2016).

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo foi avaliar a detectabilidade dos sons de vertebrados terrestres gravados por sistemas autônomos ao ar livre. Para tanto, visou-se estimar a distância máxima de detecção de frequências sonoras representativas de diferentes espécies, bem como analisar os fatores ambientais mais determinantes à propagação de cada som.

Como objetivos específicos, teve-se os seguintes:

- Associar a frequência emitida por uma espécie à capacidade de detectá-la por gravadores autônomos de som em ambientes naturais;
- Analisar a influência de fatores abióticos, como vento, pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar sobre a detecção de cada onda sonora;
- Testar a aplicabilidade do coeficiente de atenuação atmosférica da ISO 9613-1 como preditor da detecção de sons de alta frequência por gravador de morcegos;
- Mensurar o efeito da vegetação como um aparato no caminho da propagação dos sons, considerando a densidade e a agregação vegetal de cada ponto amostrado em mata nativa;
- Avaliar as implicações da emissão sonora no dossel enquanto o gravador permanece no sub-bosque;
- Propor um modelo matemático que combine ideias de importantes autores para estimar a distância máxima de detecção de um som sob determinadas condições;
- Apresentar algoritmos que, a partir de dados empíricos simples, possibilitem diversos cálculos acústicos de forma rápida e detalhada, incluindo o coeficiente de atenuação atmosférica e as estimativas de distância máxima de detecção.

Atingindo tais objetivos, pretendeu-se enfatizar o quão necessário se faz mensurar a propagação de um som dentro de um dado contexto ambiental. O intuito foi minimizar os erros amostrais em estudos bioacústicos, os quais comumente ignoram distintas detectabilidades. Logo, visaram-se modelos que estimassem o espaço amostrado por gravadores autônomos, com foco em sons de morcegos, por serem os mais difíceis de registrar. Ademais, almejou-se resultados que pudessem embasar o desenho de futuras AAPs, sendo este condizente com cada espécie alvo e com as condições ambientais no momento da gravação.

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACEVEDO, M. A. & VILLANUEVA-RIVERA, L. J. 2006. Using automated digital recording systems as effective tools for the monitoring of birds and amphibians. *Wildlife Society Bulletin*, 34(1): 211-214.
- ADAMS A. M., JANTZEN M. K., HAMILTON R. M. & FENTON M. B. 2012 Do you hear what I hear? Implications of detector selection for acoustic monitoring of bats. *Methods Ecol Evol*, 3: 992–998.
- ADLER, A. 2017. Package 'lamW'. URL: <https://bitbucket.org/aadler/lamw>
- AKAIKE H. 1973. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In: CSAKI F. & PETROV B. N. (Eds.). Second international symposium on information theory. Budapest: Akadémiai Kiadó. pp. 267–281.
- ALSTRÖM, P. & RANFT, R. 2003. The use of sounds in avian systematics and the importance of bird sound archives. *Bull. BOC*, 123: 114-135.
- ANDERSON G. S. & KRUIZE U. J. 1992. Outdoor sound propagation. In: Beranek, L. & Vér, I. L. (Eds.). 1992. *Noise and vibration control engineering - Principles and applications*. John Wiley & Sons, New York: 113-144.
- ANSELMET, F. & MATTEI, P. O. 2016. *Acoustics, aeroacoustics and vibrations*. Londres e New Jersey: ISTE Ltd e John Wiley & Sons Inc.
- ARIAS-AGUILAR, A., HINTZE, F., AGUIAR, L. M., RUFRAJ, V., BERNARD, E. & PEREIRA, M. J. R. 2018. Who's calling? Acoustic identification of Brazilian bats. *Mammal Research*, 63(3): 231-253.
- ARMSTRONG, D. A. & DAVID, A. 2011. Factorplot: Improving presentation of simple contrasts in GLMs. *Unpublished Manuscript*. URL: http://www.quantoid.net/factorplot_armstrong.pdf.
- ARRIETA, R., MINISH, C., MYRICK, D. & MCGLOTHLIN, L. 1993. Residual Noise Environment. United States Air Force: Spectrum Sciences and Software.
- ATTENBOROUGH, K. 1988. Review of ground effects on outdoor sound propagation from continuous broadband sources. *Applied acoustics*, 24(4): 289-319.
- ATTENBOROUGH, K. 2014. Sound Propagation in the Atmosphere. In: ROSSING, D. T. (Ed.). 2014. *Springer Handbook of Acoustic*. pp. 117-156. Stanford: Springer.

- AYLOR, D. 1972. Noise reduction by vegetation and ground. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 51(1B): 197-205.
- BAECKENS, S., LLUSIA, D., GARCÍA-ROA, R., & MARTÍN, J. 2019. Lizard calls convey honest information on body size and bite performance: a role in predator deterrence? *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 73(6): 87.
- BARROS, M. A. S., PESSOA, D. & RUI, A. M. 2014. Habitat use and seasonal activity of insectivorous bats (Mammalia: Chiroptera) in the grasslands of southern Brazil. *Zoologia (Curitiba)*, 31(2): 153-161.
- BASS, H. E. 1990. "Atmospheric Absorption of Sound: Update." *Journal of the Acoustical Society of America*: 88 (4), 2019–2021.
- BASS, H. E., SUTHERLAND, L. C., ZUCKERWAR, A. J., BLACKSTOCK, D. T. & HESTER, D. M. 1995. Atmospheric absorption of sound: Further developments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97(1): 680-683.
- BEASON, R. C. 2004. What can birds hear? *USDA National Wildlife Research Center-Staff Publications*: 78.
- BERANEK, L.L. 2006. Basic Acoustical Quantities: Levels and Decibels. In: BERANEK, L. L. & VER (eds.), I. L. 2006. *Noise and vibration control engineering-principles and applications*. New Jersey: John Wiley & Sons Inc. 2 ed.
- BLUMSTEIN, D. T., MENNILL, D. J., CLEMINS, P., GIROD, L., YAO, K., PATRICELLI, G. & HANSER, S. F. 2011. Acoustic monitoring in terrestrial environments using microphone arrays: applications, technological considerations and prospectus. *Journal of Applied Ecology*, 48(3): 758-767.
- BLUMENRATH, S., & DABELSTEEN, T. 2004. Degradation of great tit (*Parus major*) song before and after foliation: implications for vocal communication in a deciduous forest. *Behaviour*, 141(8): 935-958.
- BOONMAN, A. & KURNIATI, H. 2011. Evolution of high-frequency communication in frogs. *Evolutionary Ecology Research*, 13(2): 197-207.
- BOWLING, D. L., GARCIA, M., DUNN, J. C., RUPRECHT, R., STEWART, A., FROMMOLT, K. H. & FITCH, W. T. 2017. Body size and vocalization in primates and carnivores. *Nature - Scientific reports*, 7(1): 1-11.
- BRANDES, T. S. 2005. *Acoustic monitoring protocol*. Washington: Tropical Ecology Assessment and Monitoring (TEAM) Initiative.

- BREAZEALE, M. A. & MCPHERSON, M. 2014. Physical Acoustics. In: ROSSING, D. T. (ed.). 2014. *Springer Handbook of Acoustic*. Stanford: Springer.
- BREHENY, P. & BURCHETT, W. 2017. Visualization of regression models using visreg. *The R Journal*, 9(2): 56-71.
- BRENOWITZ, E. A. 1982. The active space of red-winged blackbird song. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 147(4): 511-522.
- BRITZKE, E. R., DUCHAMP, J. E., MURRAY, K. L., SWIHART, R. K. & ROBBINS, L. W. 2011. Acoustic identification of bats in the eastern United States: a comparison of parametric and nonparametric methods. *The Journal of Wildlife Management*, 75(3): 660-667.
- BRITZKE, E. R., GILLAM, E. H. & MURRAY, K. L. 2013. Current state of understanding of ultrasonic detectors for the study of bat ecology. *Acta Theriologica*, 58(2): 109-117.
- BRIZIO, C. 2015. Prominent high frequency components in nightingale songs investigated by a low-cost USB microphone. *Quaderni del Museo Civico di Storia Naturale di Ferrara*, 3: 101-110.
- BRUMM, H. 2004. The impact of environmental noise on song amplitude in a territorial bird. *Journal of animal ecology*, 73(3), 434-440.
- BRUMM, H. & HULTSCH, H. 2001. Pattern amplitude is related to pattern imitation during the song development of nightingales. *Animal Behaviour*, 61(4): 747-754.
- BRUMM, H. & ZOLLINGER, S. A. 2013. Avian vocal production in noise. In: BRUMM, H. (Ed.). *Animal communication and noise*. pp 187-227. Springer, Berlin, Heidelberg.
- BUCKLAND, S. T., ANDERSON, D. R., BURNHAM, K. P. & LAAKE, J. L. 2005. Distance sampling. In: COLTON, T. & ARMITAGE, P. (Eds.). *Encyclopedia of biostatistics*. John Wiley & Sons, vol. 2.
- BUCUR, V. 2007. *Urban forest acoustics*. Springer, Champenoux.
- BURNHAM, K. P. & ANDERSON, D. R. 2002. *A practical information-theoretic approach. Model selection and multimodel inference*. 2nd ed. Springer, New York.

CAPRANICA, R. R. 1976. Morphology and physiology of the auditory system. *In*: SZÉKELY, G., CZÉH, G. LHINÁS, R. & PRECHT, W. *Frog neurobiology* (pp. 551-575). Springer, Berlin, Heidelberg.

CHAVES, A. 2007. *Física básica: gravitação, ondas, termodinâmica*. LTC, Rio de Janeiro.

CHEK, A. A., BOGART, J. P. & LOUGHEED, S. C. 2003. Mating signal partitioning in multi-species assemblages: a null model test using frogs. *Ecology Letters*, 6(3): 235-247.

CHONG, Y. 2012. *Sonic crystal noise barriers*. Tese de doutorado, The Open University, Reino Unido.

DAIGLE, G. A. 2006. Sound propagation: Review and tutorial. *Inter-Noise and Noise-Con Congress and Conference Proceedings*: 7:817-826.

DARRAS, K., BATÁRY, P., FURNAS, B. J., GRASS, I., MULYANI, Y. A. & TSCHARNTKE, T. 2019. Autonomous sound recording outperforms human observation for sampling birds: a systematic map and user guide. *Ecological Applications*, 29(6): e01954.

DARRAS, K., PÜTZ, P., REMBOLD, K. & TSCHARNTKE, T. 2016. Measuring sound detection spaces for acoustic animal sampling and monitoring. *Biological Conservation*, 201: 29-37.

DE MENDIBURU, F. 2009. *Una herramienta de analisis estadístico para la investigación agrícola*. Tese de doutorado. Universidad Nacional de Ingeniería (UNI-PERU).

DENZINGER, A. & SCHNITZLER, H. U. 2013. Bat guilds, a concept to classify the highly diverse foraging and echolocation behaviors of microchiropteran bats. *Frontiers of Physiology* 164(4): 1-15.

DENZINGER, A., KALKO, E. K., TSCHAPKA, M., GRINNELL, A. D. & SCHNITZLER, H. U. 2016. Guild Structure and Niche Differentiation in Echolocating Bats. *In*: FENTON, M. B., GRINNELL, A., POPPER, A. N. & FAY, R. R. (Eds.). *Bat bioacoustics*, Vol. 54. pp 117-139. New York: Springer.

DEUFLHARD, P. 2004. *Newton methods for nonlinear problems: affine invariance and adaptive algorithms*. Berlin: Springer.

DOOLING, R. J. & PRIOR, N. H. 2017. Do we hear what birds hear in birdsong? *Animal behaviour*, 124: 283-289.

DORADO-CORREA, A. M., ZOLLINGER, S. A. & BRUMM, H. 2018. Vocal plasticity in mallards: multiple signal changes in noise and the evolution of the Lombard effect in birds. *Journal of Avian Biology*, 49(1): jav-01564.

DUELLMAN, W. E. & TRUEB, L. 1994. Chapter 4 - Vocalization. In: DUELLMAN, W. E. & TRUEB, L. 1994. *Biology of Amphibians*. JHU press.

EFFORD, M. G., DAWSON, D. K. & BORCHERS, D. L. 2009. Population density estimated from locations of individuals on a passive detector array. *Ecology*, 90(10): 2676-2682.

ELIOPOULOS, P. A., POTAMITIS, I. & KONTODIMAS, D. C. 2016. Estimation of population density of stored grain pests via bioacoustic detection. *Crop Protection*, 85: 71-78.

EMBLETON, TONY F. W. 1996. "Tutorial on Sound Propagation Outdoors." *The Journal of the Acoustical Society of America*: 100 (1): 31–48.

EVANS, L. B., H. E. BASS & L. C. SUTHERLAND. 1972. "Atmospheric Absorption of Sound: Theoretical Predictions." *Journal of the Acoustical Society of America*: 51 (5B): 1565–1575.

EY, E. & FISCHER, J. 2009. The "acoustic adaptation hypothesis"—a review of the evidence from birds, anurans and mammals. *Bioacoustics*, 19(1-2): 21-48.

FAGERLUND, S. 2004. Acoustics and physical models of bird sounds. In: *Seminar in acoustics*, HUT, Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing.

FARINA, A. 2014. Bioacoustics theories. In: *Soundscape Ecology: principles, patterns, methods and applications* (pp. 43-61). Dordrecht: Springer Science & Business Media.

FAY, R. R. & SIMMONS, A. M. 1999. The sense of hearing in fishes and amphibians. In: FAY, R. R. (Ed.). *Comparative hearing: fish and amphibians* (pp. 269-318). Springer, New York, NY.

FENG, A. S., NARINS, P. M., XU, C. H., LIN, W. Y., YU, Z. L., QIU, Q., Xu, Z. & SHEN, J. X. 2006. Ultrasonic communication in frogs. *Nature*, 440(7082): 333-336.

FERNANDES, J. C. 2002. *Acústica e ruídos*. Bauru: Unesp, 102 p.

FIGUEROA, H. & ROBBINS, M. A. 2008. XBAT: an open-source extensible platform for bioacoustic research and monitoring. In: Frommolt, K.H., Bardeli, R. & Clausen, M (Eds.)

Computational Bioacoustics for Assessing Biodiversity. Proc. of the Internat. Expert Meeting on IT-based Detection of Bioacoustical Patterns. BfN-Skripten. Vol. 234, pp. 143-155.

FISCHER J., STOTT J., LAW B. S., ADAMS M. D & FORRESTER R. I. 2009 Designing effective habitat studies: quantifying multiple sources of variability in bat activity. *Acta Chiroptera*, 11:127–137.

FRICKE, F. 1984. Sound attenuation in forests. *Journal of Sound and Vibration*. *Journal of Sound and Vibration*: 92(1), 149-158.

FROMMOLT, K. H., TAUCHERT, K. H. & KOCH, M. A. R. T. I. N. A. 2008. Advantages and disadvantages of acoustic monitoring of birds—realistic scenarios for automated bioacoustic monitoring in a densely populated region. *In*: FROMMOLT, K.H., BARDELLI, R. & CLAUSEN, M (Eds.) *Computational Bioacoustics for Assessing Biodiversity*. Proc. of the Internat. Expert Meeting on IT-based Detection of Bioacoustical Patterns. BfN-Skripten (Vol. 234, pp. 83-92).

GALL, M. D., RONALD, K. L., BESTROM, E. S. & LUCAS, J. R. 2012. Effects of habitat and urbanization on the active space of brown-headed cowbird song. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 132(6): 4053-4062.

GANCHEV, T. 2017. *Computational Bioacoustics: Biodiversity Monitoring and Assessment*. Varna: Walter de Gruyter GmbH & Co KG.

GERHARDT, H. C. 1975. Sound pressure levels and radiation patterns of the vocalizations of some North American frogs and toads. *Journal of Comparative Physiology*, 102(1): 1-12.

GERHARDT, H. C. 1994. The evolution of vocalization in frogs and toads. *Annual review of ecology and systematics*, 25(1): 293-324.

GIACOMA C. & CASTELLANO S. 2001. Advertisement call variation and speciation in the *Bufo viridis* complex. *In*: RYAN, M. (Ed.). *Anuran communication*. Washington: Smithsonian Institution Press.

GILLAM, E. & FENTON, M. B. 2016. Roles of acoustic social communication in the lives of bats. *In*: FENTON, M. B., GRINNELL, A., POPPER, A. N. & FAY, R. R. (Eds.). *Bat bioacoustics*, Vol. 54. pp 117-139. New York: Springer.

GIVEN, M. F. 1987. Vocalizations and acoustic interactions of the carpenter frog, *Rana virgatipes*. *Herpetologica*: 43(4): 467-481.

GJELLAND, K. Ø. & HEDGER, R. D. 2017. On the parameterization of acoustic detection probability models. *Methods in Ecology and Evolution*: 8(10), 1302-1304.

GOERLITZ, H. R. 2018. Weather conditions determine attenuation and speed of sound: environmental limitations for monitoring and analyzing bat echolocation. *Ecology and evolution*, 8(10): 5090-5100.

GOODENOUGH, A. E. & GOODENOUGH, A. S. 2012. Development of a rapid and precise method of digital image analysis to quantify canopy density and structural complexity. International Scholarly Research Network ISRN Ecology. <http://dx.doi.org/10.5402/2012/619842>.

GOODWIN, S. E. & PODOS, J. 2013. Shift of song frequencies in response to masking tones. *Animal behaviour*, 85(2): 435-440.

GRIFFIN, D. R., WEBSTER, F. A. & MICHAEL, C. R. 1960. The echolocation of flying insects by bats. *Animal behaviour*, 8(3): 141-154.

GUIMARÃES, M. DOHERTY, P. F. & MUNGUÍA-STEYER, R. 2014. Strengthening population inference in herpetofaunal studies by addressing detection probability. *South American Journal of Herpetology*, 9(1): 1-8.

HALLIDAY, D., RESNICK, R. & WALKER, J. 2012. *Fundamentos de física, volume 2: gravitação, ondas e termodinâmica*. Rio de Janeiro: LTC.

HARTMANN, W. M. & CANDY, J. V. 2014. Acoustic Signal Processing. In: ROSSING, D. T. (ed.). 2014. Springer Handbook of Acoustic. Stanford: Springer.

HEIMANN, D. SCHADY, A. & FENG, J. 2012. Atmospheric acoustics. In: IRIBARNE, J. V. & CHO, H. R. 2012. Atmospheric Physics (pp. 203-217). Berlin: Springer Science & Business Media.

HØJSGAARD, S. 2006. The doBy package. *The Newsletter of the R Project*, 6(2): 47.

HUISMAN, W. H.T. & ATTENBOROUAH, K. 1991. Reverberation and Attenuation in a Pine Forest. *Journal of the Acoustical Society of America*: 90 (5), 2664–77.

ISO (International Organization for Standardization) 1993a. ISO 9613-1:1993 - Acoustics: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere, Apêndice C. Genebra, Suíça.

ISO (International Organization for Standardization) 1993b. ISO 9613-2:1993 -Acoustics: General method of calculation. Genebra, Suíça.

JENSEN, K. K., LARSEN, O. N. & ATTENBOROUGH, K. 2008. Measurements and predictions of hooded crow (*Corvus corone cornix*) call propagation over open field habitats. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(1): 507-518.

KOBER, R. & SCHNITZLER, H. U. 1990. Information in sonar echoes of fluttering insects available for echolocating bats. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 87(2): 882-896.

KRAGH, J. 1981. Road traffic noise attenuation by belts of trees. *Journal of Sound and Vibration*: 74(2), 235-241.

KUINCHTNER, A. & BURIOL, G. A. 2016. Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. *Disciplinarum Scientia/ Naturais e Tecnológicas*, 2(1): 171-182.

KURZE, U.J. & ANDERSON S.A. 2006. Outdoor Sound Propagation. *In: BERANEK, L. L. & VER I. L. (eds.)*. 2006. Noise and vibration control engineering-principles and applications. New Jersey: John Wiley & Sons Inc. 2 ed.

KUTTRUFF, H. 2007. *Acoustic: An introduction*. New York: Taylor & Francis Group.

LAILOLO, P. 2010. The emerging significance of bioacoustics in animal species conservation. *Biological conservation*, 143(7): 1635-1645.

LANG, W.W., MALING, G.C., NOBILE, M.A. & TICKY, J. 2006. Determination of Sound Power Levels and Directivity of Noise Sources. *In: BERANEK, L. L. & VER, I. L. (eds.)*. 2006. Noise and vibration control engineering-principles and applications. New Jersey: John Wiley & Sons Inc. 2 ed.

LANGEMANN, U. L. R. I. K. E. & KLUMP, G. M. 2005. Perception and acoustic communication networks. *In: MCGREGOR, P. K. Animal communication networks*, 451-480. Cambridge: Cambridge University Press.

LARSEN, N. & WAHLBERG, M. 2017. Sound and Sound Sources. *In: BROWN, C. & RIEDE, T. (eds.)*. 2017. *Comparative Bioacoustics: An Overview*. Alabama: Bentham Science Publishers.

LATTENKAMP, E. Z., KAISER, S., KAUČIČ, R., GROBMANN, M., KOSELJ, K. & GOERLITZ, H. R. 2018. Environmental acoustic cues guide the biosonar attention of a highly specialised echolocator. *Journal of Experimental Biology*, 221(8): jeb165696.

LEFEBVRE, J.P. 1998. Physical Basis of Acoustics. *In*: FILIPPI, P., BERGASSOLI, A., HABAULT, D. & LEFEBVRE, J. P. 1998. Acoustics: basic physics, theory, and methods. Marseille: Elsevier.

LIPTAI, P., BADIDA, M. & LUKÁČOVÁ, K. 2015. Influence of atmospheric conditions on sound propagation-mathematical modeling. *Obuda University e-Bulletin*: 5(1): 127-134.

LITTLEJOHN, M. J. 1977. Long-range acoustic communication in anurans: an integrated and evolutionary approach. *In*: TAYLOR, D. H. & GUTTMAN S. I. (Eds.). 1977. *The reproductive biology of amphibians* (pp. 263-294). Springer, Boston, MA.

LIU, N., JIANG, Z., ZHANG, L., ZHONG, Z., PING, X., XU, H. & LI, C. 2016. Bioacoustic cues and their relations to dominance rank in Père David's deer stags. *Animal Production Science*, 56(6): 971-977.

LLUSIA, D., MÁRQUEZ, R. & BOWKER, R. 2011. Terrestrial sound monitoring systems, a methodology for quantitative calibration. *Bioacoustics*, 20(3): 277-286.

LOFTUS-HILLS, J. J. & JOHNSTONE, B. M. 1970. Auditory Function, Communication, and the Brain-Evoked Response in Anuran Amphibians. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 47(4B): 1131-1138.

LOHR, B., WRIGHT, T. F. & DOOLING, R. J. 2003. Detection and discrimination of natural calls in masking noise by birds: estimating the active space of a signal. *Animal behaviour*, 65(4): 763-777.

LOUGHEED, S. C., AUSTIN, J. D., BOGART, J. P., BOAG, P. T. & CHEK, A. A. 2006. Multi-character perspectives on the evolution of intraspecific differentiation in a neotropical hylid frog. *BMC Evolutionary Biology*, 6(1): 23.

LUO, J., KOSELJ, K., ZSEBŐK, S., SIEMERS, B. M. & GOERLITZ, H. R. 2014. Global warming alters sound transmission: differential impact on the prey detection ability of echolocating bats. *Journal of the Royal Society Interface*, 11(91): 20130961.

MACKENZIE, D. I., NICHOLS, J. D., LACHMAN, G. B., DROEGE, S., ANDREW ROYLE, J. & LANGTIMM, C. A. 2002. Estimating site occupancy rates when detection probabilities are less than one. *Ecology*, 83(8): 2248-2255.

MAIGNAN, A. & SCOTT, T. C. 2016. Fleshing out the generalized Lambert W function. *ACM Comm. Computer Algebra*, 50(2): 45-60.

- MARQUES, R. V. & FABIÁN, M. E. 2010. Monitoramento de morcegos insetívoros com utilização de equipamento detector de ultrassons em áreas de floresta ombrófila mista. *Chiroptera Neotropical*, 16(1) Supl.: 123-124.
- MARQUES, T. A., THOMAS, L., MARTIN, S. W., MELLINGER, D. K., WARD, J. A., MORETTI, D. J. & TYACK, P. L. 2012. Estimating animal population density using passive acoustics. *Biological Reviews*, 88(2): 287-309.
- MARTEN, K. & MARLER, P. 1977. Sound transmission and its significance for animal vocalization. *Behavioral ecology and sociobiology*: 2(3), 271-290.
- MARTIN, A. A. 1972. Studies in Australian amphibia III. The *limnodynastes dorslis* complex (Anura: Leptodactylidae). *Australian Journal of Zoology*, 20(2): 165-211.
- MARTIN, J. P., DOUCET, S. M., KNOX, R. C. & MENNILL, D. J. 2011. Body size correlates negatively with the frequency of distress calls and songs of Neotropical birds. *Journal of Field Ornithology*, 82(3): 259-268.
- MARTIN, W. F. & GANS, C. 1972. Muscular control of the vocal tract during release signaling in the toad *Bufo valliceps*. *Journal of morphology*, 137(1): 1-27.
- MATOS, M., PINTO, N. L., PEREIRA, M. J. R. & FONSECA, C. 2013. Triggering bat detectors: automatic vs. manual mode. *Mammalia*, 77(4): 461-466.
- MICKLEBURGH, S. P., HUTSON, A. M. & RACEY, P. A. 1992. *Old World fruit bats: An action plan for their conservation*. Gland, Switzerland: IUCN, 263 p.
- MORENO, J. A. 1961. Clima do Rio grande do Sul. *Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul*, 11: 49-83.
- MORISITA, M. 1959. Measuring of the dispersion of individuals and analysis of the distributions patterns. *Memoirs of the Faculty of Science*, Fukuoka, Japan, v. 2, n.4, p. 215-235.
- MORTON, E. S. 1975. Ecological sources of selection on avian sounds. *The American Naturalist*, 109(965): 17-34.
- MOTA, F. D. 1951. Estudos do clima do Estado do Rio Grande do Sul, segundo o sistema de W. Köppen. *Revista Brasileira de Geografia*, 13(2): 275-284.

MOUTERDE, S. C., THEUNISSEN, F. E., ELIE, J. E., VIGNAL, C. & MATHEVON, N. 2014. Acoustic communication and sound degradation: how do the individual signatures of male and female zebra finch calls transmit over distance? *PloS one*, 9(7): e102842.

MURRAY K. L., BRITZKE E. R. & ROBBINS L. W. 2001. Variation in search-phase calls of bats. *Journal of Mammalogy*, 82: 728–737.

NARINS, P. M., FENG, A. S., LIN, W., SCHNITZLER, H. U., DENZINGER, A., SUTHERS, R. A. & XU, C. 2004. Old World frog and bird vocalizations contain prominent ultrasonic harmonics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115(2): 910-913.

NARINS, P. M. & FENG, A. S. 2007. Hearing and sound communication in amphibians: Prologue and prognostication. *In*: NARINS, P. M., FENG, A. S., FAY, R. R. & POPPER, A. N. 2007. *Hearing and sound communication in amphibians* (pp. 1-11). Springer, New York, NY.

NEMETH, E. 2004. Measuring the sound pressure level of the song of the Screaming Piha *Lipaugus vociferans*: one of the loudest birds in the world? *Bioacoustics*, 14(3): 225-228.

NEMETH, E. & BRUMM, H. 2010. Birds and anthropogenic noise: are urban songs adaptive? *The American Naturalist*, 176(4): 465-475.

NJOROGE, A. W., AFFOIGNON, H., MUTUNGI, C., RICHTER, U., HENSEL, O., ROHDE, B. & MANKIN, R. W. 2017. Bioacoustics of *Acanthoscelides obtectus* (Coleoptera: Chrysomelidae: Bruchinae) on *Phaseolus vulgaris* (Fabaceae). *Florida Entomologist*, 100(1): 109-116.

NODA, J., TRAVIESO, C. & SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, D. 2017. Fusion of Linear and Mel Frequency Cepstral Coefficients for Automatic Classification of Reptiles. *Applied Sciences*, 7(2): 178.

NPL (NATIONAL PHYSICAL LABORATORY). 2018. Calculator that computes the attenuation coefficient according to ISO 9613-1. <http://resource.npl.co.uk/acoustics/techguides/absorption/>. Acessado em março de 2019.

OBRIST, M. K., PAVAN, G., SUEUR, J., RIEDE, K., LLUSIA, D. & MÁRQUEZ, R. 2010. Bioacoustics approaches in biodiversity inventories. *Abc Taxa*, 8: 68-99.

ÖHLUND, O. & LARSSON, C. 2015. Meteorological effects on wind turbine sound propagation. *Applied Acoustics*: 89, 34-41.

- PATRIQUIN, K. J., HOGBERG, L. K., CHRUSZCZ, B. J. & BARCLAY, R. M. 2003. The influence of habitat structure on the ability to detect ultrasound using bat detectors. *Wildlife Society Bulletin*, 475-481.
- PARRIS, K. M. & MCCARTHY, M. A. 2013. Predicting the effect of urban noise on the active space of avian vocal signals. *The American Naturalist*, 182(4): 452-464.
- PARSONS, S. 1996. A comparison of the performance of a brand of broad-band and several brands of narrow-band bat detectors in two different habitat types. *Bioacoustics*, 7(1): 33-43.
- PAVAN, G. 2008. Short field course on bioacoustics. *Taxonomy Summer School*, 1-15.
- PELLET J. & SCHMIDT, B. R. 2005. Monitoring distributions using call surveys: estimating site occupancy, detection probabilities and inferring absence. *Biological Conservation*, 123(1): 27-35.
- PETTERSSON, L. 2004. The properties of sound and bat detectors. *In*: BRIGHAM, R. M., KALKO, E. K. V., JONES, G., PARSONS, S. & LIMPENS, H. J. G. A. 2004. *Bat echolocation research: tools, techniques and analysis*. Bat Conservation International, Austin, Texas, p. 9-12.
- PIERCE, A.D. 2014. Basic Linear Acoustics. *In*: ROSSING, D. T. (ed.). 2014. *Springer Handbook of Acoustic*. Stanford: Springer.
- PRESTWICH, K. N., BRUGGER, K. E. & TOPPING, M. 1989. Energy and communication in three species of hylid frogs: power input, power output and efficiency. *Journal of Experimental Biology*, 144(1): 53-80.
- PRESTWICH, K. N. 1994. The energetics of acoustic signaling in anurans and insects. *American Zoologist*, 34(6): 625-643.
- PRICE, M. A., ATTENBOROUGH, K. & HEAP, N. W. 1988. Sound attenuation through trees: measurements and models. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84(5): 1836-1844.
- PRICE, J. J. 2013. Why is birdsong so repetitive? Signal detection and the evolution of avian singing modes. *Behaviour*, 150(9-10): 995-1013.
- PRINTES, R. C. 2002. *Plano de manejo participativo da Reserva Biológica do Lami*. Porto Alegre: Secretaria Municipal do Meio Ambiente. 102p.

RIO GRANDE DO SUL. 1997. *Plano de manejo: Parque Estadual de Itapuã*. Porto Alegre: Departamento de Recursos Naturais Renováveis. 158 p.

RITSCHARD, M. 2012. *On the significance of song amplitude in birds—function, mechanisms, and ontogeny*. Tese de doutorado, University of Konstanz, Austria.

ROSSING, D. T. 2014. Introduction to Acoustics. *In*: ROSSING, D. T. (Ed.). 2014. *Springer Handbook of Acoustic*. pp. 1-7. Stanford: Springer.

SARKAR, D. 2008. *Lattice: multivariate data visualization with R*. New York: Springer.

SCHWARTZ, J. J. 1991. Why stop calling? A study of unison bout singing in a Neotropical treefrog. *Animal Behavior*, 42: 565–577.

SCHWARTZ, J. J. & BEE, M. A. 2013. Anuran acoustic signal production in noisy environments. *In*: BRUMM (Ed.). 2013. *Animal communication and noise* (pp. 91-132). Heidelberg, Berlin: Springer.

SCHERER, A., MARASCHIN-SILVA, F. & BAPTISTA, L. D. M. 2005. Florística e estrutura do componente arbóreo de matas de Restinga arenosa no Parque Estadual de Itapuã, RS, Brasil. *Acta botanica brasílica*, 19(4): 717-726.

SCHNITZLER, H. U. & K. V. KALKO, E. K. V. 1998. Echolocation. *In*: KUNZ, T. H. & RACEY, P. A (Eds.). *Bat biology and conservation*. 10th International Bat Research Conference 1995: Boston University. Smithsonian Institution Press.

SCHNITZLER, H. U. & K. V. KALKO, E. K. V. 2001. Echolocation by Insect-Eating Bats. *BioScience*, 51(7): 557-569.

SCHNITZLER, H. U., MOSS, C. F. & DENZINGER, A. 2003. From spatial orientation to food acquisition in echolocating bats. *Trends in Ecology & Evolution*, 18(8): 386-394.

SCHREIBER, L. & BECKENBAUER, T. 2012. Sound propagation outdoors. *In*: MÜLLER, G. & MÖSER, M. (eds.). 2012. *Handbook of Engineering Acoustics* (pp. 125-135). Berlin: Springer Science & Business Media.

SIMMONS, J. A. & STEIN, R. A. 1980. Acoustic imaging in bat sonar: echolocation signals and the evolution of echolocation. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 135(1): 61-84.

SHONFIELD, J. & BAYNE, E. 2017. Autonomous recording units in avian ecological research: current use and future applications. *Avian Conservation and Ecology*, 12(1).

SKOWRONSKI, M. D. & FENTON, M. B. 2008. Model-based detection of synthetic bat echolocation calls using an energy threshold detector for initialization. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(5): 2643-2650.

SPECHT, R. 2017. *Avisoft-SASLab Pro (Version 5.2.10)*. Berlin, Germany: Avisoft Bioacoustics.

STILZ, W. P. & SCHNITZLER, H. U. 2012. Estimation of the acoustic range of bat echolocation for extended targets. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 132(3): 1765-1775.

STOWELL, D. 2018. Computational bioacoustic scene analysis. In: VIRTANEN, T., PLUMBLEY, M. D. & ELLIS, D. (eds.). (2018). *Computational analysis of sound scenes and events* (pp. 303-333). Heidelberg: Springer.

TARRERO, A. I., MARTÍN, M. A., GONZÁLEZ, J., MACHIMBARRENA, M. & JACOBSEN, F. 2008. Sound propagation in forests: A comparison of experimental results and values predicted by the Nord 2000 model. *Applied Acoustics*: 69(7), 662-671.

TEIXEIRA, D., MARON, M. & VAN RENSBURG, B. J. 2019. Bioacoustic monitoring of animal vocal behavior for conservation. *Conservation Science and Practice*, e72.

THOMPSON, S. J., HANDEL, C. M. & MCNEW, L. B. 2017. Autonomous acoustic recorders reveal complex patterns in avian detection probability. *The Journal of Wildlife Management*, 81(7): 1228-1241.

THOMPSON, M. E., SCHWAGER, S. J., PAYNE, K. B. & TURKALO, A. K. 2010. Acoustic estimation of wildlife abundance: methodology for vocal mammals in forested habitats. *African Journal of Ecology*, 48(3): 654-661.

TYAGI, V., KUMAR, K. & JAIN, V. K. 2013. Road traffic noise attenuation by vegetation belts at some sites in the Tarai Region of India. *Archives of Acoustics*: 38(3), 389-395.

VARGAS-SALINAS, F. & AMÉZQUITA, A. 2014. Abiotic noise, call frequency and stream-breeding anuran assemblages. *Evolutionary ecology*, 28(2): 341-359.

WADDLE, J. H., THIGPEN, T. F. & GLORIOSO, B. M. 2009. Efficacy of automatic vocalization recognition software for anuran monitoring. *Herpetological Conservation and Biology*, 4(3), 384-388.

WAHLBERG, M. & LARSEN, N. 2017. Propagation of Sound. *In*: BROWN, C. & RIEDE, T. (Eds.). 2017. *Comparative Bioacoustics: An Overview*. Alabama: Bentham Science Publishers.

WALTERS, C. L., COLLEN, A., LUCAS, T., MROZ, K., SAYER, C. A. & JONES, K. E. 2013. Challenges of using bioacoustics to globally monitor bats. *In*: ADAMS, R. A. & PEDERSEN, S. C. (Eds.). *Bat evolution, ecology, and conservation* (pp. 479-499). New York: Springer.

WELLER, T. J. & ZABEL, C. J. 2002. Variation in bat detections due to detector orientation in a forest. *Wildlife Society Bulletin*, 922-930.

WELLS, K. D. & SCHWARTZ, J. J. 2007. The behavioral ecology of anuran communication. *In*: NARINS, P. M., FENG, A. S., FAY, R. R. & POPPER, A. N. (Eds.). 2007. *Hearing and sound communication in amphibians* (pp 44–86). New York: Springer.

WELLS, K. D. & TAIGEN, T. L. 1989. Calling energetics of a neotropical treefrog, *Hyla microcephala*. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 25(1): 13-22.

WICKHAM, H. 2009. *Ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. New York: Springer.

WILSON, D. K., NYKAZA, E. T., WHITE, M; J., SWEARINGEN, M. E., PATER, L. L. & LUZ, G. A. 2013. *In*: FERNANDO, H. J. (Ed.). 2013. *Handbook of Environmental Fluid Dynamics - Volume Two: Systems, Pollution, Modeling, and Measurements*. New York: CRC Press.

WITT, P. B. 2013. *Fauna e Flora da Reserva Biológica Lami José Lützenberger*. Porto Alegre: Secretaria Municipal do Meio Ambiente.

XIE, J., TOWSEY, M., YASUMIBA, K., ZHANG, J. & ROE, P. 2015. Detection of anuran calling activity in long field recordings for bio-acoustic monitoring. *In*: *2015 IEEE Tenth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP)* (pp. 1-6). IEEE.

YIP, D., LESTON, L., BAYNE, E., SÓLYMOS, P. & GROVER, A. 2017. Experimentally derived detection distances from audio recordings and human observers enable integrated analysis of point count data. *Avian Conservation and Ecology*, 12(1).

ZOLLINGER, S. A. & BRUMM, H. 2015. Why birds sing loud songs and why they sometimes don't. *Animal Behaviour*, 105: 289-295.

ZUUR, A. F., IENO, E. N., WALKER, N. J., SAVELIEV, A. A., SMITH, G. M. & WALKER, N. J. 2009. Mixed effects models and extensions in ecology with R. *In*: GAIL M., KRICKEBERG K., SAMET J. M., TSIATIS A., WONG W. (Eds.). *Statistics for biology and health*. 2009. Springer, New York: NY.