

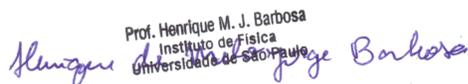
INICIAÇÃO CIENTÍFICA, RELATÓRIO FINAL

Período: 1/Fevereiro/2020 a 1/Agosto/2020 (6 meses)

Título: Limite de detecção de um sistema lidar: um estudo de modelagem para aerossóis no topo da troposfera

Instituição: Universidade de São Paulo, Instituto de Física

Endereço: Rua do Matão, 1371, São Paulo-SP 05508-090


Prof. Henrique M. J. Barbosa
Instituto de Física
Universidade de São Paulo

Orientador: Henrique M. J. Barbosa +55 (11) 3091-8985 hbarbosa@if.usp.br

Keith Richard Brauer Sales

Bolsista: Keith Richard Brauer Sales (N usp 11224511) richardbrauer17@usp.br

Resumo	2
Objetivo do projeto de pesquisa	2
Troca do bolsista	2
Leituras sugeridas	2
Aerossóis e suas características principais	3
Formação e transformação de aerossóis	3
Interação de aerossóis com radiação eletromagnética	5
Desenvolvimento da Metodologia	6
Calibração da simulação utilizando dados do Lidar	6
Resultados e discussão	8
Calibração da simulação do sinal molecular	8
Inclusão dos aerossóis da moda de acumulação	10
Obtenção das propriedades ópticas do aerossol de acumulação	10
Ajuste do perfil de concentração mássica do aerossol de acumulação	11
Simulação incluindo os aerossóis	12
Conclusão	13
Referências	14

Resumo

Existe uma discussão a respeito das fontes e mecanismos físicos associados à produção de aerossóis no topo da troposfera (UT, do inglês *Upper troposphere*) na Amazônia (Andreae et al., 2018). O entendimento atual, a partir de observações feitas com aviões, é que as nuvens transportam compostos orgânicos voláteis, que condensam formando partículas devido às baixas temperaturas. Neste contexto, este projeto propôs uma abordagem para utilizar um Lidar em solo para tentar medir estes aerossóis na UT (até 15 km de altitude). Em vista disso, o primeiro passo foi utilizar um código de transferência radiativa chamado *libRadtran* (Mayer e Kylling (2005)) para simular o sinal molecular do Lidar, onde utilizamos os dados do próprio equipamento para calibrar a simulação através de um ajuste por mínimos quadrados. Em seguida, incluímos os aerossóis da moda de acumulação na simulação e aplicamos um teste de hipóteses de χ^2 em janelas de 500 metros para encontrar regiões onde foi possível detectar esse aerossol - considerando o ruído dos dados. O primeiro resultado importante que obtivemos foi durante o processo de calibração, onde concluímos que às incertezas do sinal do Lidar (do tipo Poisson) estavam subestimadas. Segundo o método que utilizamos para corrigi-las, a nova estimativa é cerca de 23% maior que a primeira. Outro resultado importante foi que o teste de hipóteses foi eficiente em determinar regiões onde a concentração mássica do aerossol de acumulação era maior (i.e. abaixo de 4 km). Devido às baixas concentrações na UT, não foi possível detectar os aerossóis nesse nível. Em um estudo futuro, será avaliado se um aumento da potência do laser, ou do tempo de integração seriam suficientes para permitir sua detecção.

Objetivo do projeto de pesquisa

O principal objetivo deste projeto de iniciação científica é investigar se um sistema lidar terrestre, como o operado por nosso laboratório na região central da Amazônia, pode medir a luz dispersada por partículas recém-formadas no topo da troposfera.

Troca do bolsista

O bolsista aprovado inicialmente para o desenvolvimento deste projeto se formou bacharel em física em dezembro de 2019, e finalizou seu vínculo com o PIBIC em janeiro de 2020 após o envio do primeiro relatório (6 meses). O novo bolsista teve que se familiarizar com o assunto, e por isso o cronograma foi reiniciado. Este segundo relatório também cobre um período de 6 meses.

Leituras sugeridas

Nesta seção, fazemos um resumos das leituras sugeridas para este período da bolsa de iniciação científica, pois uma das propostas desta iniciação científica foi estudar alguns artigos

e capítulos de livros. A leitura destes materiais foi importante para aumentar meu conhecimento, e ajudar a guiar o estudo realizado neste projeto.

Aerossóis e suas características principais

Aerossóis são partículas sólidas ou líquidas em suspensão em fase gasosa na atmosfera (Seinfeld e Padis, 1998) capazes de alterar a visibilidade, o balanço radiativo atmosférico, a saúde das pessoas e a química da atmosfera (Artaxo et al., 2006). A origem desse material particulado na atmosfera surge de fontes naturais e antropogênicas e são classificados a partir de sua formação: primários ou secundários. Os primários são diretamente enviados à atmosfera, e os secundários são formados a partir de processos físicos e químicos na atmosfera, principalmente pela conversão gás-partícula, nucleação e condensação. As partículas mais grossas tem em torno de 100 μm , as finas são menores que 1 μm e as ditas ultrafinas com menos de 100 nm, divididas nas modas de nucleação e de Aitken.

A composição química se relaciona com a higroscopicidade do aerossol, sua capacidade de formar núcleos de condensação de nuvens ou gelo, a facilidade da deposição úmida e etc.. Entretanto, a mistura desses aerossóis na atmosfera transforma sua composição química e ocorre pela coagulação de diferentes partículas com suas respectivas composições químicas, alterando ou não suas propriedades iniciais. As principais constituições químicas dos aerossóis são os inorgânicos, Black Carbon, orgânicos e espécies minerais.

Aerossóis inorgânicos têm em geral alta capacidade de absorver água, crescendo em tamanho consoante ao aumento da umidade relativa local e não absorvem bem a luz do espectro solar. Material inorgânico é comum em aerossóis, sendo o sal marinho inorgânico e um dos aerossóis mais abrangentes no mundo, por exemplo. O Black Carbon é produzido na combustão incompletas de combustíveis com cadeia longa de carbono, na ausência de oxigênio. Tem ocorrência na queima de biomassa e em combustões domésticas. Normalmente, é abraçado por carbono orgânico e isso o torna mais higroscópico.

Os aerossóis orgânicos são componentes de moléculas orgânicas, em geral ocorre a mistura de centenas destas em sua formação. Absorvem pouca luz na região do visível, pela comum presença de compostos que são incolores, como os hidrocarbonetos. A fração orgânica que absorve luz é chamada de Brown Carbon.

Formação e transformação de aerossóis

As partículas de aerossol são principalmente sal marinho, poeira do deserto, de queima de biomassa, vulcânicos, e antropogênicos (diagrama 1).

Os aerossóis marinhos cobrem grande parte da superfície terrestre, e são emitidos majoritariamente pela rebentação das ondas nas regiões costeiras. Já no deserto, o vento é o precursor da suspensão da poeira como Aerossol na atmosfera. Em torno de 37% da superfície terrestre é formada por regiões áridas e semiáridas, viabilizando a poeira como um dos principais Aerossóis atmosféricos. A queima de biomassa nos incêndios florestais resulta na emissão e elevação de gases e partículas na atmosfera. Os incêndios podem ser naturais ou iniciados pelo homem. Na Amazônia, há baixa ocorrência de queimadas naturais por causa da alta taxa de precipitação, sendo o desmatamento e a queimada causadas pelo homem a

principal fonte de aerossóis (Artaxo et al., 2013). Outra fonte dos aerossóis antropogênicos é a poluição urbana. Por fim, nas erupções vulcânicas, os aerossóis expelidos podem chegar até a Estratosfera, tamanha a força com que são arremessados. São produzidos na combustão de entidades químicas dentro do vulcão.

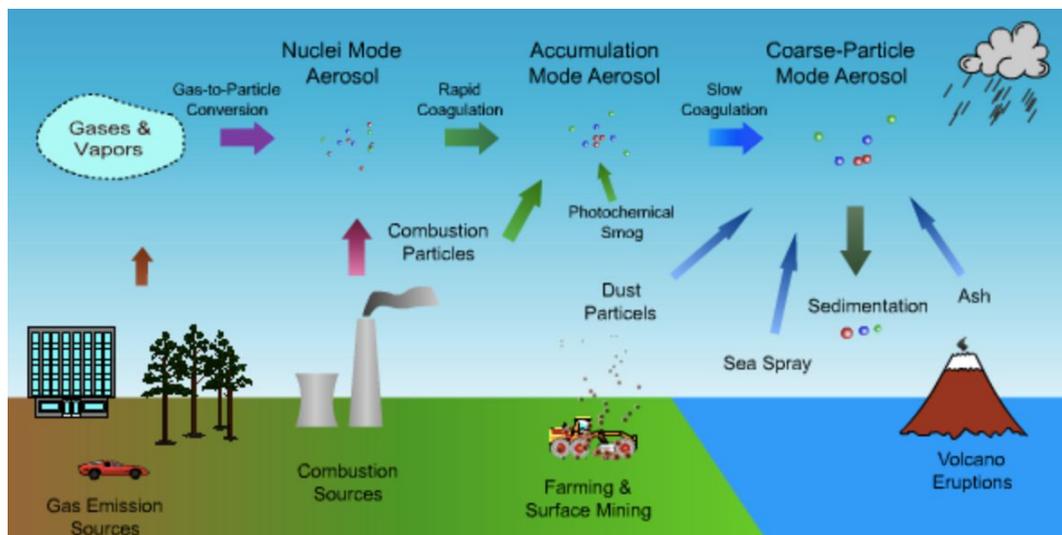


Diagrama 1 - Fontes e processos importantes para os aerossóis atmosféricos. Fonte: https://aerosol.ees.ufl.edu/atmos_aerosol/section05.html

Consorte às diversas formas de emissão, os aerossóis apresentam diferenças em suas composições químicas, seus tamanhos e suas geometrias. Os menores e maiores aerossóis tem residência na atmosfera de horas e dias, enquanto a maior parte dos aerossóis médios tem permanência de semanas (Boucher, O. Aerosol Properties and Climate Impacts, 2015, p. 17). Essas partículas são transportadas pelo vento mas estão sujeitas à alguns processos físico-químicos que são capazes de transformar, transportar e as remover da atmosfera (ver diagrama 2), tais como:

1. Nucleação. Esse processo influencia a dinâmica do aerossol, bem como a estruturação e concentração de núcleos de condensação da nuvem. Representa o agrupamento de moléculas gasosas em um núcleo de aerossol. Esse tipo de nucleação é chamada homogênea, já que na nucleação heterogênea, ou condensação, a mudança de fase ocorre em uma superfície pré-existente (Boucher, O. Aerosol Properties and Climate Impacts, 2015, 65).
2. Condensação. Ocorre quando determinados compostos se aderem a partículas de aerossóis, aumentando seus diâmetros e transferindo massa.
3. Coagulação. A Coagulação ocorre quando duas partículas colidem e formam uma nova partícula, aglomerando-se. A sua causa básica é movimento browniano dos aerossóis, na ocorrência de choques entre essas partículas e as moléculas do ar. Esse processo permite que as partículas cresçam até tamanhos onde a sedimentação se torna significativa (Sportisse, 2010).

4. Produção em nuvens. Os compostos ou espécies químicas solúveis se dissolvem na água presente nas nuvens, e quando essas gotas das nuvens evaporam, aerossóis são liberados.
5. Sedimentação. É um processo gravitacional, que se relaciona com a massa e a distância das partículas. Redistribui verticalmente os aerossóis independente de outros processos e o movimento é lento em razão das dimensões diminutas dessas partículas, sendo o transporte convectivo dominante na troposfera.
6. Deposição seca. A deposição é um instrumento eficaz de remoção de poluentes do ar para a superfície terrestre e ramificam-se em seca e úmida. Na deposição seca ocorre a deposição direta de partículas por sedimentação. É facilitada em partículas com maior diâmetro e gases na ausência de chuva. Depende da concentração de entidades químicas no ar, turbulência dos ventos, características físico-químicas das partículas e gases, velocidade de deposição e a aderência com a superfície receptora.
7. Deposição úmida. Na deposição úmida, gases e aerossóis são retirados da atmosfera por processos hidrometeorológicos, tais como chuva, nuvens, neve, neblina e etc.. A extração ocorre devido a captura por gotas de chuva, neve e gelo. O efeito essencial da deposição úmida é a chuva ácida que é resultado da formação de íons pela oxidação e dissolução dos gases poluentes nas nuvens.

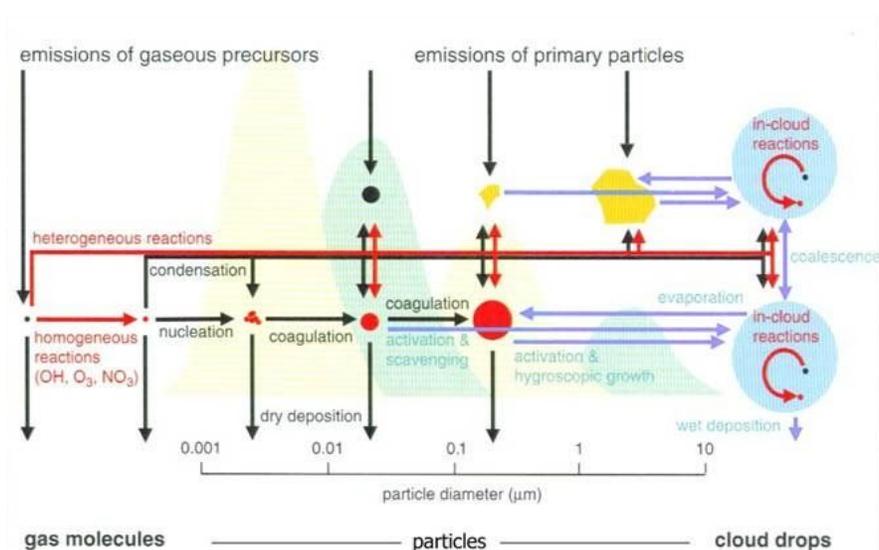


Diagrama 2 - Principais processos microfísicos e químicos que influenciam a distribuição e a composição química de partículas de aerossol atmosférico. Adaptado de Brasser et al. (2003).

Interação de aerossóis com radiação eletromagnética

O fenômeno da dispersão ocorre quando a radiação solar (ondas curtas) interage com os aerossóis e é desviada em todas as direções de forma não isotrópica.

O espalhamento Rayleigh acontece quando uma onda interage com partículas muito menores do que o comprimento de onda aludido. Dessa forma, as radiações com menores comprimentos de onda, como a violeta e o azul, sofrem mais espalhamento Rayleigh que o

vermelho e o infravermelho. O espalhamento Mie, por outro lado, descreve o espalhamento de radiação eletromagnética quando estas têm comprimento de onda de mesmo tamanho aproximado ou maiores que as partículas que interagem.

De outra forma, o processo de absorção ocorre quando nessa interação a energia da radiação solar é transformada em calor e o aerossol absorve essa energia. Esses dois processos ocorrem também na interação com radiação terrestre, de onda longa. São estas interações da radiação com os aerossóis que faz com que o sinal de um sistema lidar se modifique com a altitude, à medida que se propaga. Detalhes sobre a técnica lidar foram apresentados de maneira detalhada no texto do projeto de pesquisa.

Desenvolvimento da Metodologia

Calibração da simulação utilizando dados do Lidar

Os dados observacionais utilizados nesta seção foram obtidos pelo UV Raman lidar (Barbosa et al., 2014) para um comprimento de onda de 355 nm no dia 14 de setembro de 2014. Esses dados foram utilizados no processo de calibração da nossa simulação, onde consideramos apenas às medidas entre às 21 e 23 horas (horário local). Nesse horário, o ruído de fundo devido a luz solar é desprezível, portanto, optamos por não removê-lo dos dados. Contudo, para a série temporal completa da figura 1 foi necessário remover o fundo devido ao forte efeito da luz solar durante o dia. Essa figura mostra toda a série temporal de medidas do Lidar, onde podemos observar claramente a presença de nuvens e uma camada de aerossóis até 4 km. O sinal cai abaixo de 1 km devido a sobreposição entre o feixe laser e o campo de visão do telescópio.

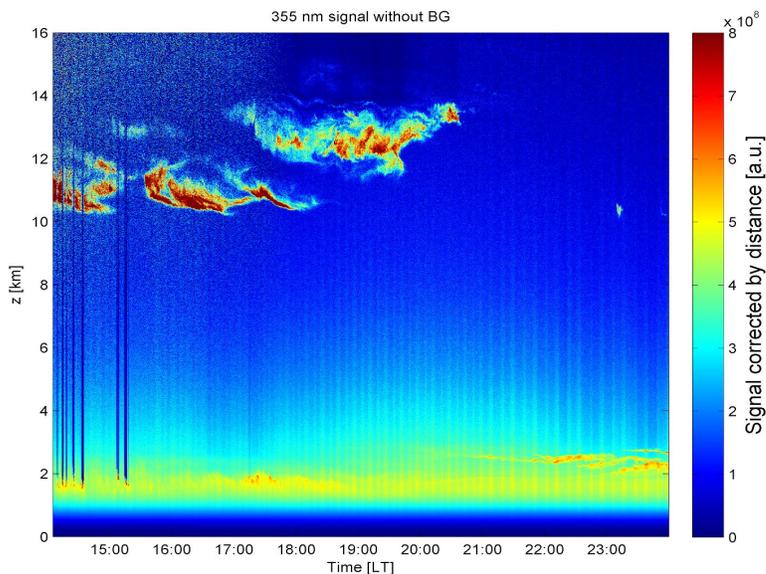


Figura 1. Série Temporal do sinal do lidar em 355 nm com ruído removido e correção pela distância para o dia 14/9/2014. O período escolhido para a calibração da simulação são das 21 às 23 horas, onde não há sinal de nuvens. O tempo está em hora local [LT].

O período de dados escolhidos para a calibração varre um intervalo de tempo de aproximadamente 2 horas, totalizando 251 perfis verticais de 30s. A figura 2 mostra todos os perfis obtidos desse intervalo temporal mais o perfil médio (em preto). O processo de calibração consiste em determinar uma constante de proporcionalidade (κ) entre o sinal simulado e o medido para corrigir os parâmetros da simulação que dependem do instrumento, como potência do feixe, eficiência de detecção e área do telescópio. Isso foi feito através do ajuste da equação 1 (onde $P(z, \lambda)_{\text{molecular}}$ é o sinal molecular do Lidar simulado pelo libRadtran para $\lambda = 355 \text{ nm}$ em função da altitude) ao perfil médio dos dados do Lidar numa região supostamente ausente de aerossóis (entre 6 à 9 km). Essa região foi determinada pela análise da figura 2, onde visualmente o sinal de material particulado é bem fraco (azul).

$$f_{sim}(z, \lambda) = \kappa P_{mol}(z, \lambda) \quad (1)$$

Evitamos considerar aerossóis e nuvens neste modelo pois a concentração destes constituintes atmosféricos variam muito, e serão posteriormente inferidas através da análise do sinal do lidar. Por outro lado, a concentração de moléculas na região é bem conhecida, além disso, utilizamos dados de radiossondas da campanha GOAmazon2014/5 disponibilizados pelo site do Atmospheric Radiation Measurement (ARM, 2014). Com os dados de temperatura e pressão em função da altitude, o libRadtran estima corretamente as densidades das moléculas na região pela lei geral dos gases.

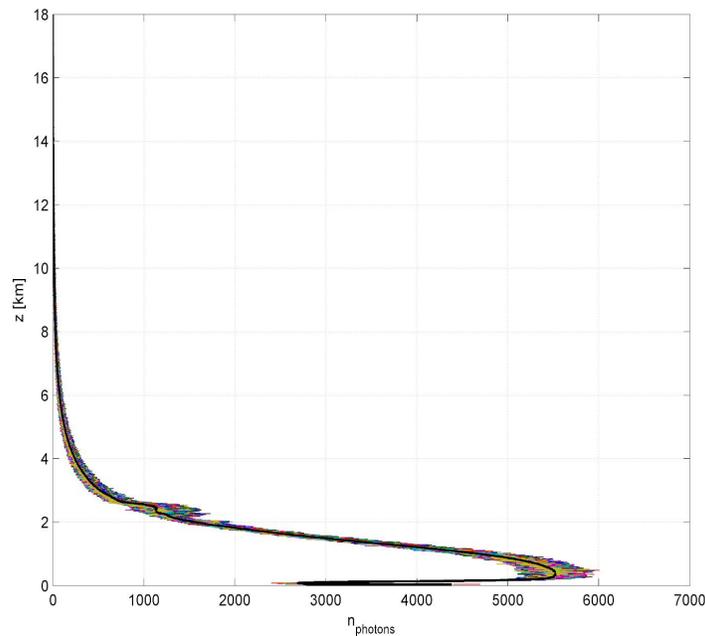


Figura 2. Perfis verticais utilizados para a calibração mostrando o número de fótons detectados em função da altitude.

Assim, o ajuste do equação 1 ao perfil médio do Lidar (figura 2) entre 6 à 9 km foi feito pelo método dos mínimos quadrados, onde a matriz de covariância dos dados é diagonal com incertezas descritas pela equação 2, onde $N = 251$ (número de perfis).

$$\sigma_n = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N n_i} \quad (2)$$

Essa equação é resultado da propagação de incertezas de cada perfil, onde o número de contagens de cada bin vertical de detecção (largura de 7.5 metros) segue uma função de probabilidade (f.p) do tipo Poisson (ver Weitkamp, 2006). Essa é uma estimativa teórica para dados sujeitos a erros aleatórios, e existe uma série de fatores que não foram levados em conta. Por exemplo, a própria variabilidade da atmosfera ao longo do tempo (escala de várias horas) e a variação da temperatura da eletrônica de emissão (laser) e detecção (ADC) (escala de 15 min, devido ao ar condicionado do instrumento), que acabam influenciando a probabilidade de detecção. Em cada bin, o sinal esperado deveria se manter constante ao longo do tempo, para que de fato os dados sigam uma Poisson. Como será discutido na próxima seção, decidimos corrigir às incertezas pelo método do χ^2 , que consiste em adotar um modelo linear para a nova incerteza descrito pela equação 3. Essa estimativa nova assume que os dados são estatisticamente independentes (matriz de covariância diagonal) e faz com que o χ^2 do ajuste se iguale ao número de graus de liberdade. O objetivo dessa correção foi melhorar a estimativa da incerteza do parâmetro κ .

$$\hat{\sigma}_n = \sigma_n \sqrt{\chi^2_{red}} \quad (3)$$

Resultados e discussão

Esta seção faz uma discussão sobre as análises envolvendo a simulação do sinal do Lidar. Primeiro determinamos a constante de calibração da simulação através dos métodos descritos na seção anterior. Em seguida, completamos a simulação do sinal molecular incluindo o ruído característico do equipamento. Por fim, finalizamos nossa discussão com a inclusão dos aerossóis da moda de acumulação no sinal simulado e discutimos uma primeira abordagem para detectar esse aerossol em meio ao ruído do equipamento.

Calibração da simulação do sinal molecular

Assim como foi descrito na seção anterior, fizemos um ajuste inicial do modelo molecular (equação 1) ao perfil médio do número de contagens do Lidar, numa região entre 6 à 9 km de altitude (figura 3) e considerando as incertezas dadas pela equação 2. Obtemos um valor de χ^2 alto em relação ao número graus de liberdade, resultando em um $p_{valor} = 1.8e-10$, ou seja, é muito improvável obter um valor de χ^2 igual ou superior a este. Como não observamos nenhuma tendência significativa no gráfico de resíduos (figura 3), certamente o problema relacionado ao χ^2 alto está na subestimação das incertezas. O mais provável é que a variação

da temperatura esteja alterando o número de fótons emitidos em cada pulso de laser, o que aumentará a variância do sinal detectado. Então, tentamos corrigi-las pela equação equação 3, onde $\sqrt{\chi_{red}^2} = 1.23$, ou seja, a nova estimativa da incerteza é cerca de 23 % maior que a antiga. Em seguida fizemos um novo ajuste com às incertezas corrigidas e obtemos $\kappa = 0.07067$ (4). Apesar de termos feito essas correções esperando uma melhoria na estimativa da incerteza do parâmetro κ , não obtivemos diferenças significativas.

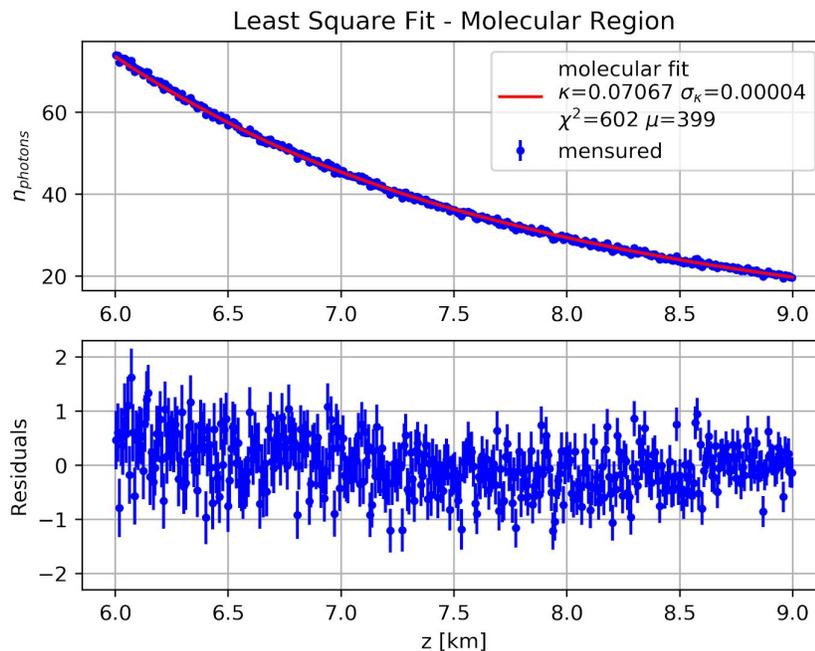


Figura 3. Ajuste da equação 1 usando o sinal molecular do Lidar simulado pelo libRadtran aos dados observacionais do Lidar numa região com pouco aerossol. A legenda da figura mostra o valor do parâmetro κ , sua incerteza σ_{κ} , χ^2 e número de graus de liberdade μ .

A figura 4 (à esquerda) mostra o sinal molecular simulado já considerando o parâmetro κ obtido. Como não havia nenhum sinal claro de aerossóis e nuvens nos dados do Lidar acima da região ajustada, o modelo molecular seguiu representando bem os dados até final do gráfico (em 19 km aproximadamente). É importante mencionar que a simulação considera a função de sobreposição (*overlap*) do Lidar igual a 1.0 em todo o perfil vertical. Por essa razão e por não estarmos incluindo o sinal dos aerossóis na simulação, o modelo não é adequado de 0 até aproximadamente 2.6 km.

O próximo passo foi simular o ruído. Utilizamos o perfil simulado e, em cada bin de 7.5m, sorteamos um número aleatório seguindo uma distribuição de Poisson com valor médio igual ao valor simulado. O processo foi repetido 251 vezes, para produzir a mesma quantidade de perfis utilizados para gerar o perfil médio do Lidar. Por fim, calculamos o perfil simulado médio. Dessa forma, conseguimos reproduzir o ruído típico do equipamento como mostra a

figura 4 (à direita), onde podemos observar que a simulação conseguiu representar razoável bem o ruído da medida do instrumento.

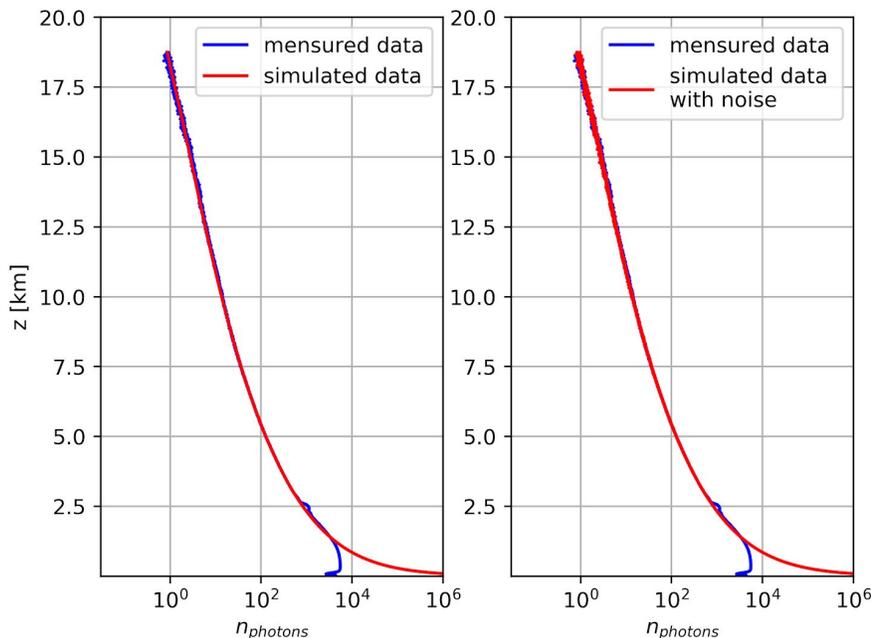


Figura 4. (Esquerda) Comparação entre o perfil médio observado e o perfil ajustado da simulação molecular; e (direita) comparação similar, mas incluindo a simulação do ruído.

Inclusão dos aerossóis da moda de acumulação

Obtenção das propriedades ópticas do aerossol de acumulação

Para incluir os aerossóis na simulação foi necessário obter um arquivo com suas propriedades ópticas. Tal arquivo foi obtido utilizando um código de espalhamento *mie* do próprio libRadtran. Esse código precisa da distribuição de tamanho, índice de refração real e complexo e densidade dos aerossóis. Em relação a distribuição de tamanho, continuamos utilizando a mesma do relatório anterior, obtida por Andreae et al. (2018) em 5800 metros. É razoável assumir que distribuição tem duas modas, representando dois tipos de aerossóis, os ultrafino e os de acumulação, portanto, fizemos um ajuste da combinação linear de duas lognormais (Seinfeld e Pandis, 2006) como mostra a figura 5. Os parâmetros obtidos de cada moda, como concentração total (N em cm^{-3}), raio efetivo (μ em μm) e desvio padrão geométrico (σ em μm) estão reportados na legenda da figura 5. Podemos perceber que o modelo não se ajustou bem aos dados, claramente há uma tendência grande dos pontos ao redor do ajuste (principalmente ao redor do primeiro máximo), porém estamos interessados em ter apenas uma aproximação dessa distribuição.

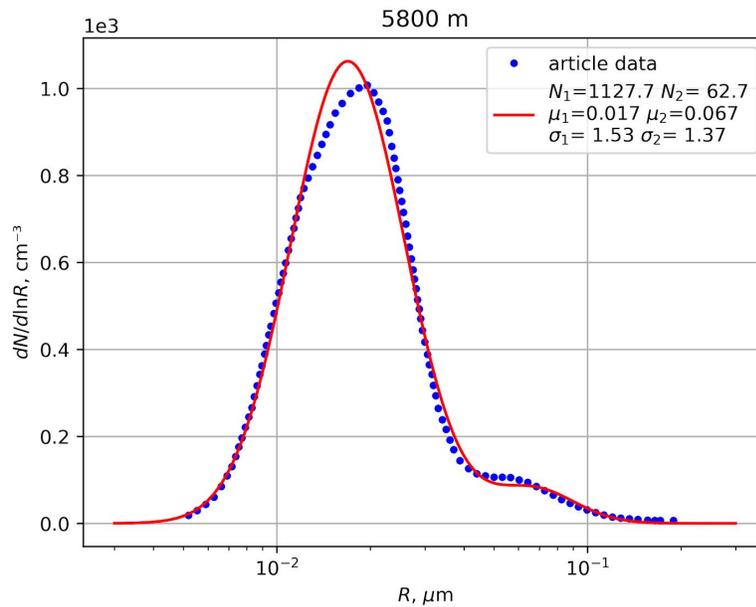


Figura 5. Ajuste da distribuição de tamanho em 5800 metros do artigo Andreae et al. (2018). Foi ajustado a soma de 2 lognormais, portanto, os índices de cada parâmetro correspondem a distribuição de cada tipo de aerossol separadamente. Cada um tem uma concentração numérica total (N), raio efetivo (μ) e desvio padrão geométrico (σ).

Contudo, utilizamos apenas os dados da distribuição do aerossol da moda de acumulação na simulação (menor moda da figura 5). Fizemos isso para discutir a abordagem de um teste estatístico que verifica se conseguimos ou não detectá-lo em meio ao ruído do equipamento. Escolhemos o aerossol da moda de acumulação porque seu sinal é mais forte que o ultrafino, dessa forma será mais fácil detectá-lo no nosso teste. Enfim, com os parâmetros do ajuste da distribuição de tamanho desse aerossol (N_2 , μ_2 e σ_2), seu índice de refração real e complexo (1.41 e 0.013, obtido pela rede AERONET¹) e uma densidade típica de 1.5 g/cm³, rodamos o código mie e obtemos o arquivo de propriedades ópticas necessário para a simulação.

Ajuste do perfil de concentração mássica do aerossol de acumulação

Além do arquivo de propriedades ópticas também é necessário fornecer ao libRadtran um perfil de concentração mássica do aerossol considerado. O perfil de concentração mássica do aerossol de acumulação (figura 6) sugere um comportamento gaussianóide em aproximadamente 1.2 km e 11 km, portanto ajustamos a soma de duas gaussianas mais um termo constante (figura 6). O objetivo desse ajuste é apenas suavizar a curva de concentração, portanto não estamos preocupados em avaliar a qualidade do ajuste do ponto de vista estatístico, mas representar aproximadamente onde este tipo de aerossol ocorre na coluna

¹ <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>

atmosférica. A vantagem em utilizar esse modelo é poder variar seus parâmetros em análises futuras e ver como isso influencia a detecção do aerossol.

Note que a figura do ajuste está convertida em concentração mássica, diferentemente dos dados disponibilizados no artigo (concentração numérica), pois o perfil de concentração aceito pelo libRadtran precisa estar termos da massa. Para fazer a conversão multiplicamos o perfil numérico pelo volume do aerossol (suposto esférico com raio efetivo μ_2 da distribuição da figura 5) e pela densidade padrão assumida como 1.5 g/cm^3 .

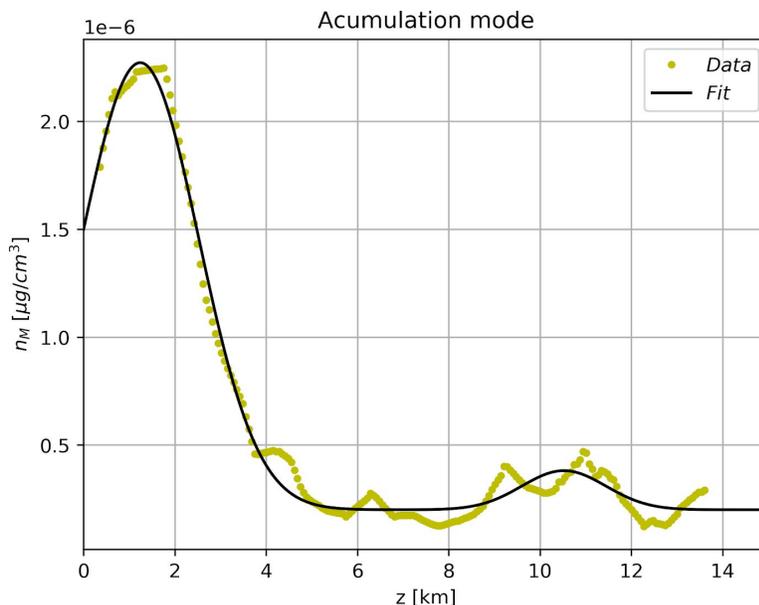


Figura 6. Ajuste do perfil de concentração mássica do aerossol de acumulação obtido pelo leitor de imagem online da figura extraída do artigo Andreae et al., 2018.

Simulação incluindo os aerossóis

Depois de gerar os arquivos de propriedades ópticas e concentração mássica dos aerossóis da moda de acumulação, incluímos esses dados de aerossol em uma nova simulação do sinal do Lidar. A figura 7 (à esquerda) mostra o sinal do perfil médio molecular simulado anteriormente (vermelho) e o perfil médio da nossa nova simulação com aerossol (amarelo). Os sinais dessa figura foram corrigidos pela distância (multiplicamos o sinal por z^2) e normalizados através da divisão de todo o perfil por uma média entre 6 à 8 km, onde aparentemente temos pouco aerossol (figura 6). Dessa forma, conseguimos colar os dois sinais e facilitar a visualização da separação entre eles nos primeiros 3 km de altitude.

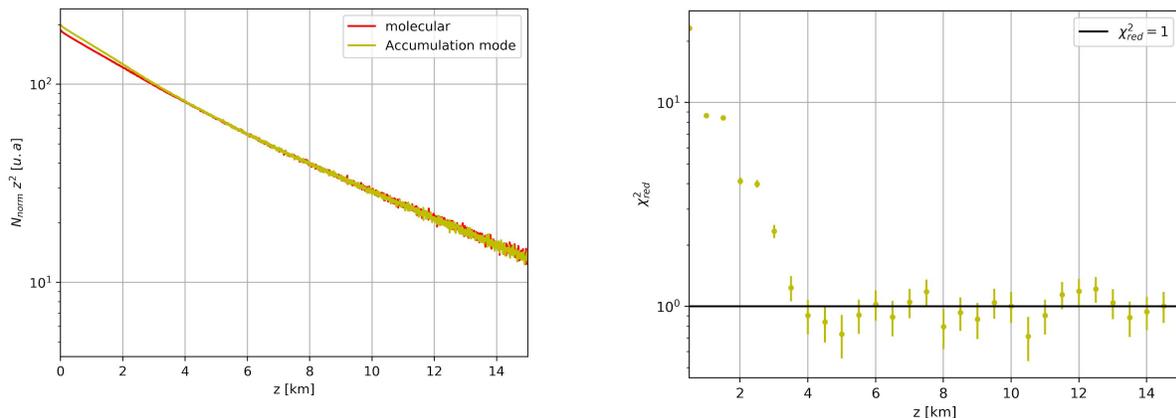


Figura 7. Comparação entre o sinal puramente molecular e com aerossol da moda de acumulação (normalizados e corrigidos pela distância como descrito no texto) à esquerda. À direita, temos um gráfico de χ^2_{red} para ajustes moleculares em janelas de 500 metros ao sinal com aerossol de acumulação.

Para sabermos de uma maneira quantitativa se esses aerossóis foram detectados em meio ao ruído e às incertezas do sinal simulado, decidimos fazer um teste de hipóteses do tipo χ^2 em janelas de 500 metros sobre o perfil dos aerossóis (em amarelo na figura 7 à esquerda). Nesse caso, a hipótese nula é que o sinal é molecular, portanto, ajustamos o modelo molecular nessas janelas, onde esperamos que o χ^2 seja próximo do número de graus de liberdade para aceitar esse modelo. Nas regiões onde o χ^2 for muito alto, recusamos a hipótese nula, ou seja, estamos detectando o aerossol. É importante ressaltar que conhecemos bem às incertezas dos dados ajustados, pois trata-se de uma simulação (cada perfil com incerteza de Poisson). Portanto, esperamos obter apenas um erro devido a inadequação do modelo, que resultaria em um χ^2 alto (ou χ^2_{red} maior que 1). Por essa razão só faz sentido descartar valores altos dessa variável, tratando-se de um teste monocaudal.

A figura 7 (à direita) mostra o gráfico de χ^2_{red} para esses ajustes, onde valores muito maiores que 1 rejeitam a hipótese nula (modelo molecular). Essa figura mostra de forma clara que estamos detectando aerossóis até aproximadamente 3 km, que é a região em que sua concentração é máxima (figura 6). Os aerossóis em torno de 10.5 km não foram detectados.

Conclusão

Um dos primeiros pontos que podemos destacar da nossa análise é que o processo de calibração da simulação funcionou adequadamente, e fomos capazes de simular o sinal médio medido pelo nosso lidar. Além disso, ao adicionar a simulação a um gerador de números aleatórios com f.p de Poisson reproduzimos muito bem o ruído da medição. Por fim, a utilização de um teste de hipóteses de χ^2 em janelas de 500 metros se mostrou eficiente

Conseguimos detectar os aerossóis da moda de acumulação próximos da superfície, mas não no topo da troposfera. Tudo indica que se tivéssemos simulado os aerossóis

ultrafinos, também não conseguiríamos detectá-los. Seria necessário variar sua concentração para encontrar qual a concentração mínima necessária para que fossem detectados. Esse trabalho foge do escopo de uma iniciação científica. Além disso, simulamos apenas um tipo de aerossol com uma distribuição de tamanho, quando na verdade essa distribuição muda com a altitude. Isto seria considerado em uma próxima etapa desta iniciação científica, mas a bolsa de 6 meses (devido a troca do bolsista) termina com este relatório.

De maneira geral, os resultados apresentados aqui revelam os procedimentos e os cuidados que precisam ser tomados ao fazer uma simulação do Lidar usando o libRadtran, além de uma possível abordagem quantitativa para determinar regiões de detecção de aerossóis, que poderiam ser explorados em um mestrado.

Referências

- Andreae, M. O., et al., 2018: Aerosol characteristics and particle production in the upper troposphere over the Amazon Basin, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 921-961, doi:10.5194/acp-18-921-2018.
- Atmospheric Radiation Measurement (ARM) user facility. 2014, updated hourly. Balloon-Borne Sounding System (SONDEWNP). 2014-01-01 to 2015-12-01, ARM Mobile Facility (MAO) Manacapuru, Amazonas, Brazil; AMF1 (M1). Compiled by D. Holdridge, R. Coulter, J. Kyrouac and E. Keeler. ARM Data Center. Data set accessed 2020-08-05 at <http://dx.doi.org/10.5439/1021460>.
- Barbosa, H. M. J., Barja, B., Pauliquevis, T., Gouveia, D. A., Artaxo, P., Cirino, G. G., Santos, R. M. N., and Oliveira, A. B., 2014: A permanent raman lidar station in the Amazon: description, characterization and first results, *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 1745-1762.
- Boucher, O. *Atmospheric Aerosols: Properties and Climate Impacts*. Springer Netherlands, 2015.
- Carmo CN, Hacon SS, Longo KM, Freitas S, Ignotti E, Artaxo P, et al. Associação entre material particulado de queimadas e doenças respiratórias na região sul da Amazônia brasileira. *Rev Panam Salud Publica*. 2010;27(1):10-6.
- Célia Alves. Atmospheric aerosols: historical perspective, sources, chemical formation processes and organic composition. *Quím. Nova* vol.28 no.5 São Paulo Sept./Oct. 2005.
- Brasseur, Prinn, and Pzseny, *Atmospheric Chemistry in a Changing World*, IGBP Series, Springer, 2003.
- Mayer, B. and Kylling, A. (2005). Technical note: The libradtran software package for radiative transfer calculations - description and examples of use. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5(7):1855–1877.
- Seinfeld, J. and Pandis, S. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*.
- Sportisse, B. *Fundamentals in Air Pollution: From Processes to Modelling*. Netherlands: Springer Science & Business Media, 2009.
- Wallace, J.M. e Hobbs, P.V. - *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. Academic Press, New York, 2006, 467p
- Weitkamp, C. (2006). *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*. Springer Series in Optical Sciences. Springer New York.