

Relatório de Atividades

Calibração dos perfis de vapor de água medidos com Lidar Raman

Período: 01/08/2011 a 31/01/2012.

Bolsista: Diego Alves Gouveia.

Docente: Prof. Dr. Henrique de Melo Jorge Barbosa

1. Resumo do Projeto

Neste projeto de iniciação científica o bolsista ira estudar como é o funcionamento de um Lidar-Raman e ira calibrar as medidas dos perfis verticais de umidade especifica usando dados: (1) do projeto Dense GNSS Network, e/ou (2) das sondagens operacionais realizadas no aeroporto de Manaus, e e/ou (3) das sondagens realizadas pelo projeto AEROCLIMA. O período de estudo será entre julho e outubro de 2011, durante uma campanha intensiva de calibração, quando o radar de apontamento vertical e o disdrômetro do projeto CHUVA estarão instalados no KM 30 da AM-010, onde já estão instalados o Lidar, o fotômetro, e o radiômetro do projeto AEROCLIMA, alem de uma estação GNSS do projeto Dense GNSS Network.

2. Introdução

2.1 Lidar-Raman

LIDAR (Light Detection And Ranging) é um sistema de sensoriamento remoto ativo baseado em laser. À medida que o pulso de radiação eletromagnética se afasta, parte dele será atenuado no caminho reduzindo a intensidade do sinal. Ao medir a intensidade da luz retro-espalhada em função do tempo estamos fazendo uma medida da quantidade de material espalhador em função da altura. A figura 1 mostra um sinal típico. (coloque uma figura de um dos capítulos de livro que você tem: ela deve mostrar o pulso subindo, sendo espalhado, e por fim detectado no telescópio... assim o leitor vai entender a equação a seguir...)

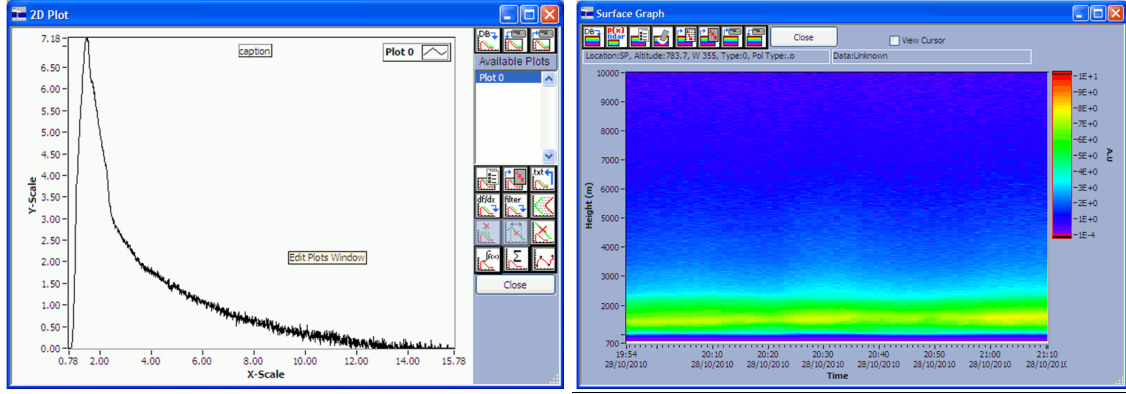


Figura 1: Testes feitos com o Lidar-Raman em São Paulo. Esquerda: sinal típico para o espalhamento elástico, e direita: evolução da camada de poluição.

A equação do lidar, que dá a intensidade do sinal detectado de uma certa altura, pode ser escrita de maneira simplificada como:

$$P(z, \lambda) = P_0 \frac{c\Delta T}{2} A_{tel} \eta_{eff}(\lambda) \frac{O(z)}{z^2} \beta(z, \lambda) \exp \left[-2 \int_0^z \alpha(z', \lambda) dz' \right]$$

onde a potência inicial do pulso, P_0 , e seu comprimento, $c\Delta t/2$, determinam a intensidade inicial do feixe e o termo exponencial representa a atenuação deste pulso no caminho até a altitude z . Uma fração $\beta(z, \lambda)$ do sinal cruzando a altitude z será retro espalhada e poderá ser detectada por um telescópio de área A_{tel} e eficiência quântica $\eta_{eff}(\lambda)$. No caminho de retorno, o sinal também será atenuado, por isto o fator 2 na exponencial, mas também haverá dispersão e por isto o fator z^{-2} . O termo $O(z)$ é um fator geométrico que dá a sobreposição entre o feixe de laser e o campo de visão do telescópio.

No Lidar-Raman do projeto AEROCLIMA, medimos o sinal de retorno em 3 comprimentos de onda diferentes: o espalhamento elástico em 355 nm, e os espalhamentos inelásticos em 387 nm, devido à seção de choque raman do N₂, e 408 nm, devido à seção de choque raman do H₂O. Neste caso, a equação do lidar-raman é dada por:

$$P(z, \lambda) = P_0 \frac{c\Delta T}{2} A_{tel} \eta_{eff}(\lambda') \frac{O(z)}{z^2} \beta(z, \lambda, \lambda') \exp \left[\int_0^z (\alpha(z', \lambda) + \alpha(z', \lambda')) dz' \right] \quad (1)$$

onde o coeficiente de retro-espalhamento é escrito como $\beta(z, \lambda, \lambda')$ para incluir o espalhamento de comprimentos de onda λ em λ' , e atenuação é calculada de maneira diferente na subida $\alpha(z', \lambda)$ e na descida $\alpha(z', \lambda')$.

2.2 Medida de Vapor de Água com Lidar-Raman

Como a concentração de N₂ é constante, pode-se medir a concentração de H₂O na atmosfera tomando a razão entre o sinal nestes dois canais [1], o que elimina fatores pouco conhecidos como o fator geométrico de sobreposição. Esta é uma técnica bem estabelecida [2] e consegue-se observar o conteúdo de vapor de água desde próximo ao chão até a alta troposfera com boa resolução vertical e temporal.

A partir da equação (1) para $\lambda' = 408 \text{ nm}$ e $\lambda'' = 387 \text{ nm}$, obtemos que a razão entre os dois sinais é dada por:

$$\frac{S_{H_2O} - BG_{H_2O}}{S_{N_2} - BG_{N_2}} = C''' \frac{\sigma_{H_2O}}{\sigma_{N_2}} \frac{w_{H_2O}}{w_{N_2}} \frac{T_{H_2O}^A}{T_{N_2}^A} \frac{T_{H_2O}^M}{T_{N_2}^M}$$

onde a constante adimensional C''' depende apenas dos fatores relacionados à instrumentação, e.g., componentes ópticos e fotomultiplicadoras, e só deve variar com o envelhecimento dos componentes, ou se algo for alterado na configuração, e.g. colocação de filtros ou variação da tensão nas PMTs. σ_{H_2O} e σ_{N_2} são as seções de choque de espalhamento raman; w_{H_2O} e w_{N_2} são as razões de mistura; $T_{H_2O}^A$ e $T_{N_2}^A$ são os coeficientes de transmissão devido aos aerossóis; e $T_{H_2O}^M$ e $T_{N_2}^M$ devido ao espalhamento molecular. O ruído de fundo, BG , precisa ser descontado do sinal S registrado em cada canal, sendo estimado a partir do sinal do espectro, ie, acima de 30 km.

Esta equação pode ser simplificada para a seguinte forma:

$$w_{H_2O} = C'' \Gamma_A \Gamma_M \frac{\overline{S_{H_2O}} - \overline{BG_{H_2O}}}{\overline{S_{N_2}} - \overline{BG_{N_2}}}$$

onde a constante C'' (g/kg) inclui além do termo C''' , a razão de mistura do N₂ e as seções de choque; e Γ_A e Γ_M são razão entre os coeficientes de transmissão para N₂ e H₂O. As barras indicam uma média temporal e espacial para se obter uma razão sinal ruído adequada [3].

Há diferentes abordagens na literatura para tratar a equação acima. Alguns autores estimam o coeficiente de transmissão Rayleigh (molecular) a partir do perfil de densidade obtido pela radiossonda para excluí-lo da constante de calibração [4],

$$w_{lidar} = C' Sinal', \text{ onde } Sinal' = \Gamma_M \frac{\overline{S_{H_2O}} - \overline{BG_{H_2O}}}{\overline{S_{N_2}} - \overline{BG_{N_2}}}, \text{ e } C' = C'' \Gamma_A$$

enquanto outros incluem tanto o coeficiente Rayleigh quanto mie (aerossóis) na constante de calibração [5], assim

$$w_{lidar} = CSinal, \text{ onde } Sinal = \frac{\overline{S_{H_2O} - BG_{H_2O}}}{\overline{S_{N_2} - BG_{N_2}}} \text{ e } C = C''\Gamma_A\Gamma_M \quad (2)$$

A primeira metodologia é mais precisa, mas sua operacionalização após a campanha de calibração torna-se mais complexa por não se dispor dos perfis de densidade necessários na estimativa de Γ_M . Uma possibilidade seria estimá-lo usando os dados de pressão e temperatura na superfície; ou extrapolar os perfis medidos nas sondagens operacionais realizadas a aproximadamente 40 km. A segunda metodologia é mais direta e foi utilizado neste trabalho, tanto devido ao prazo de vigência da bolsa, quanto por se tratar de uma iniciação científica.

2.3 Constante de Calibração

A calibração do sistema Lidar-Raman do projeto AEROCLIMA para a medida do vapor de água foi feita utilizando dados de radiosondagens, que fornecem medidas in situ da razão de mistura do vapor de água. A constante de calibração (ver eq. 2) é obtida através de uma ajuste linear entre *Sinal* e o perfil de razão de mistura da sondagem, $w_{H_2O}^{sounding}$. Ela pode ser determinada com precisão de 2 a 6% [6] sendo que 3% desta incerteza são devido à variação da constante para diferentes sondagens.

O processo de calibração pode ser dividido em 3 passos:

1. O primeiro é fazer uma média temporal dos perfis obtidos com o lidar, sendo geralmente utilizado entre 5 a 100 min. Deve-se tomar cuidado na escolha do intervalo de integração pois um tempo muito curto poderia não resultar em uma boa razão sinal ruído, e um tempo muito longo poderia suavizar variações reais no perfil de vapor de água.

2. O segundo é interpolar os dados de alta resolução do perfil vertical do lidar para os níveis da sondagem.

3. Por fim, é feita a regressão linear entre $w_{H_2O}^{sounding}$ e *Sinal*, usando o método dos mínimos quadrados, para obter C e ΔC .

Encontra-se uma constante para cada sondagem e, para efeito de calcular o perfil de vapor a partir dos dados do lidar, utiliza-se o valor médio da constante e o erro na média.

3. Procedimento e Resultados Experimentais.

Para a calibração, utilizamos sondagens operacionais realizadas em fevereiro de 2011 entre os dias 2 e 17 no aeroporto militar de Manaus e sondagens do projeto ACCONVEX¹ (não... as sondagens foram feitas por um projeto meu. Veja a nota de rodapé e troque todos os “chuva” por acconvex) realizadas entre os dias 30 de agosto e 9 de setembro de 2011.

O aeroporto militar de Manaus fica a 30 km de distância do campus da Embrapa, onde está instalado o lidar-raman. Assim, os dados da razão de mistura do vapor de água pelas sondagens operacionais do aeroporto se referem a um perfil vertical que fica distante de aproximadamente 30 km do local onde os dados do Lidar foram coletados. Mesmo com esta distância, acreditamos que a floresta amazônica conserve uma homogeneidade do ar nas regiões adjacentes, viabilizando a utilização destas sondagens. Em uma tentativa de minimizar os efeitos introduzidos pela distância entre as radiosondagens operacionais e o *Sinal* obtido pelo Lidar, fizemos uma função de correlação temporal entre esses dados, que mostrava em torno de qual minuto o *Sinal* do lidar apresentava o maior coeficiente de correlação com a sondagem operacional. Fizemos isto imaginando que as correntes de ar existentes naquela região mudariam os perfis de vapor de água com o tempo. Na maioria dos casos, a função de correlação apontava o máximo coeficiente de correlação nos minutos em torno de 0 UTC (20h no horário local), mesmo horário que eram feitas as radiosondagens operacionais do aeroporto de Manaus, corroborando a hipótese acima. Já as sondagens do projeto CHUVA foram realizadas no mesmo sítio onde está instalado o lidar.

Para obter uma boa razão sinal-ruído, fizemos uma média temporal de apenas 10 min do Sinal do lidar. Com esta pequena média temporal, conseguimos conservar pequenas variações no perfil vertical de vapor de água. Após isto, fizemos uma interpolação linear nos perfil vertical de alta resolução do lidar para os níveis da sondagem. Com isto, pudemos determinar a constante de calibração da equação 2 por um fit linear, para cada uma das sondagens. Com as constantes de calibração em mãos, plotamos os perfis verticais de vapor de água obtidos pela radiosondagem e do lidar.

¹ O projeto ACCONVEX (Aerosol, Cloud, Convection Experiment in the Amazon) é uma parceria entre o Laboratório de Física da Atmosfera (LFA) do IFUSP, o CPTEC-INPE, a UEA-AM e o LBA-INPA-AM.

Dois exemplos dos gráficos da calibração utilizando as sondagens operacionais do aeroporto militar e dos plots dos perfis são mostrados nas figuras 2 e 3.

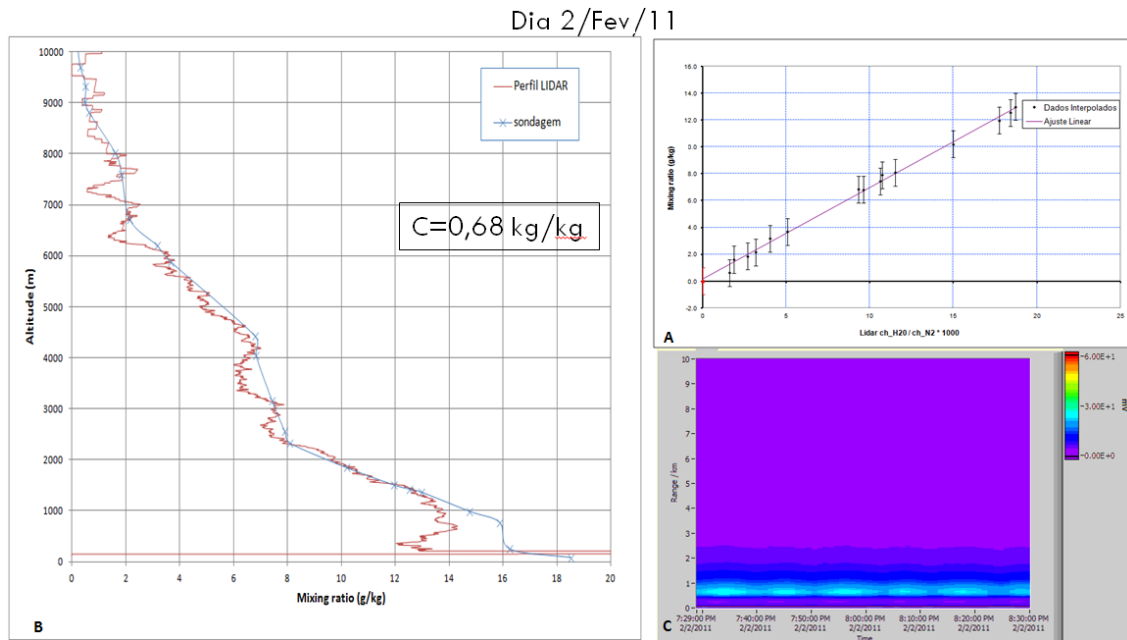


Figura 2: A) Ajuste linear entre o *Sinal* do lidar e os dados de razão de mistura da sondagem operacional do aeroporto miliar de Manaus do dia 2 de fevereiro de 2011, para obtenção da constante de calibração da equação 2. B) Gráfico do perfil vertical de vapor de água obtidos pela sondagem e do sistema lidar-raman calibrados. C) Série temporal do perfil vertical do canal de espalhamento elástico do lidar em função do tempo.

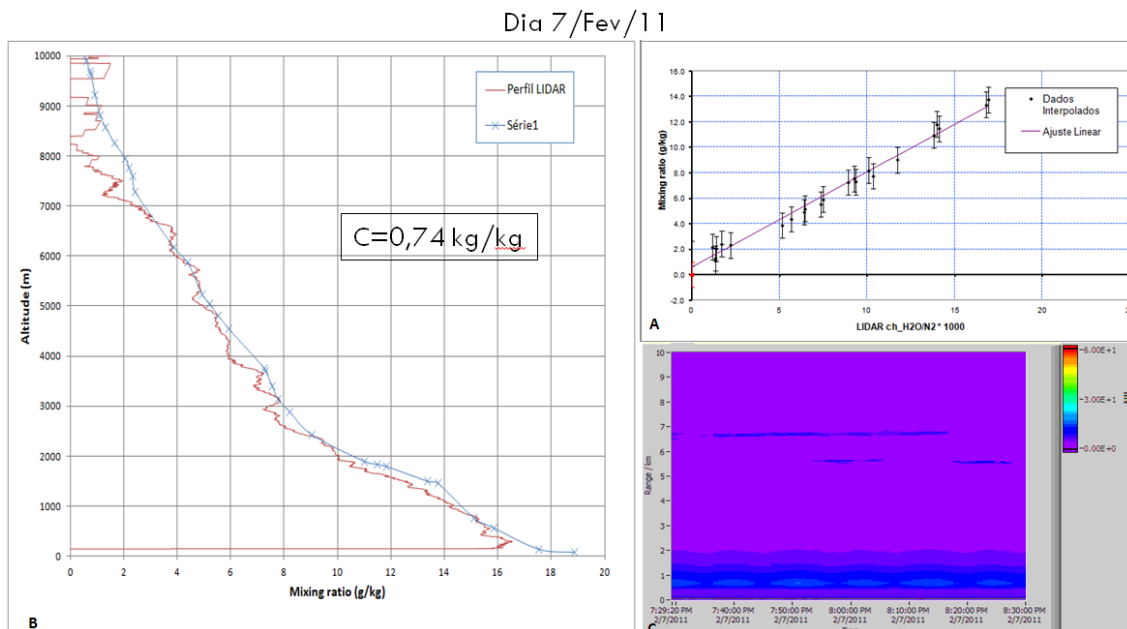


Figura 3: A) Fit linear entre o *Sinal* do lidar e os dados de razão de mistura da sondagem operacional do aeroporto miliar de Manaus do dia 7 de fevereiro de 2011, para obtenção da constante de calibração da equação 2. B) Plot do perfil vertical de vapor de água obtidos pela sondagem e do sistema lidar-raman

calibrados. C) Plot dos dados do canal de espalhamento elástico do lidar em função do tempo. (mude de acordo com as sugestões anteriores)

As figuras 2 e 3 são dois exemplos da calibração do lidar com utilizando sondagens do aeroporto militar de Manaus. Observamos nos gráficos que os perfis verticais para o vapor de água obtidos com as sondagens e com o sinal calibrado do lidar (w_{lidar}) seguem a mesma tendência entre si. Ao todo, foram utilizadas 12 sondagens operacionais do aeroporto para a obtenção das constantes de calibração, com resultados semelhantes aos apresentados nas figuras 2 e 3.

Também utilizamos as sondagens do projeto CHUVA para a calibração do sistema lidar. Essas sondagens, 8 no total, que foram realizadas no mesmo sitio onde está o nosso sistema lidar. Com a mesma metodologia para a calibração apresentada acima, vemos um exemplo do perfil vertical de vapor de água no gráfico da figura 4.

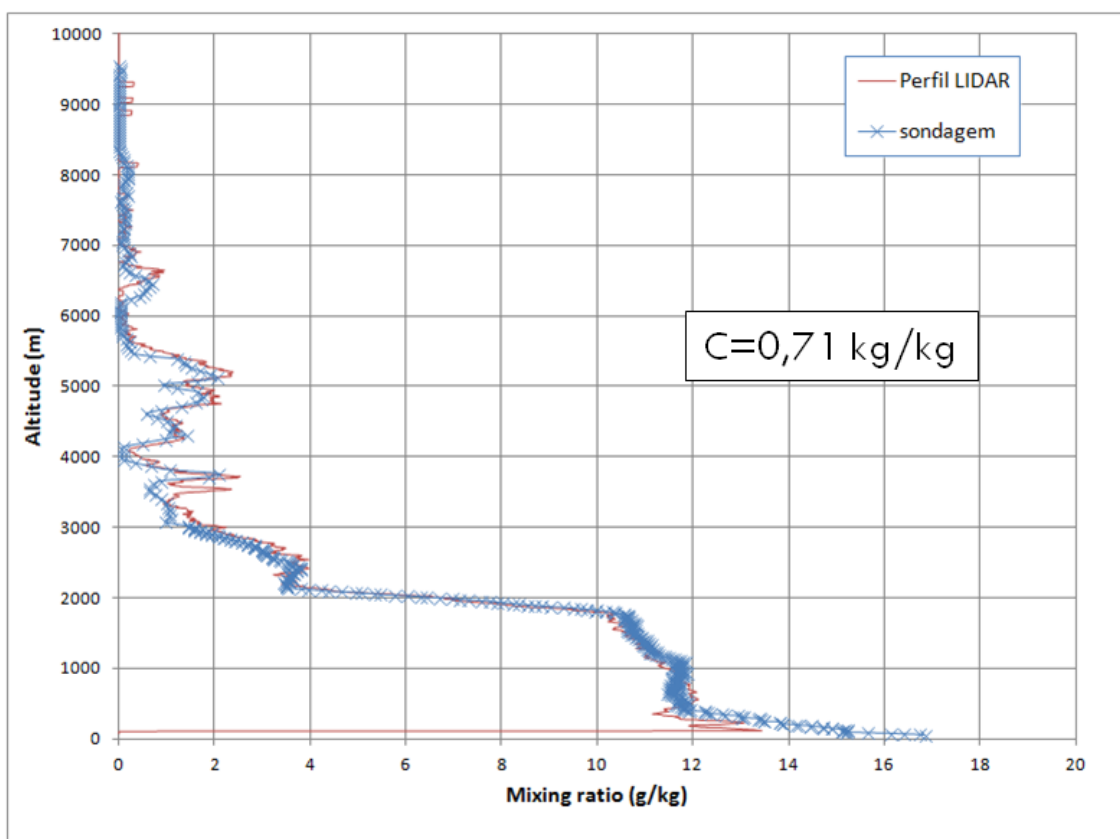


Figura 4: Plot do perfil vertical de vapor de água obtidos pela sondagem do projeto CHUVA no dia 2 de setembro de 2011 e do sistema lidar-raman calibrado.

Na figura 4, vemos que a sondagens do projeto CHUVA possui uma grande resolução vertical. Isto, e o fato da sondagem ter sido realizada no mesmo local de

instalação do lidar, fornecem uma constante de calibração com maior confiança. Vemos que os dados da sondagem e do lidar calibrado fornecem uma concordante (não entendi a frase, precisa ajeitar) sobre a razão de mistura do vapor de água.

Juntando as calibrações realizadas com sondagens do aeroporto e do projeto CHUVA, foram obtidas 20 constantes de calibração, dados do histograma no gráfico da figura 5.

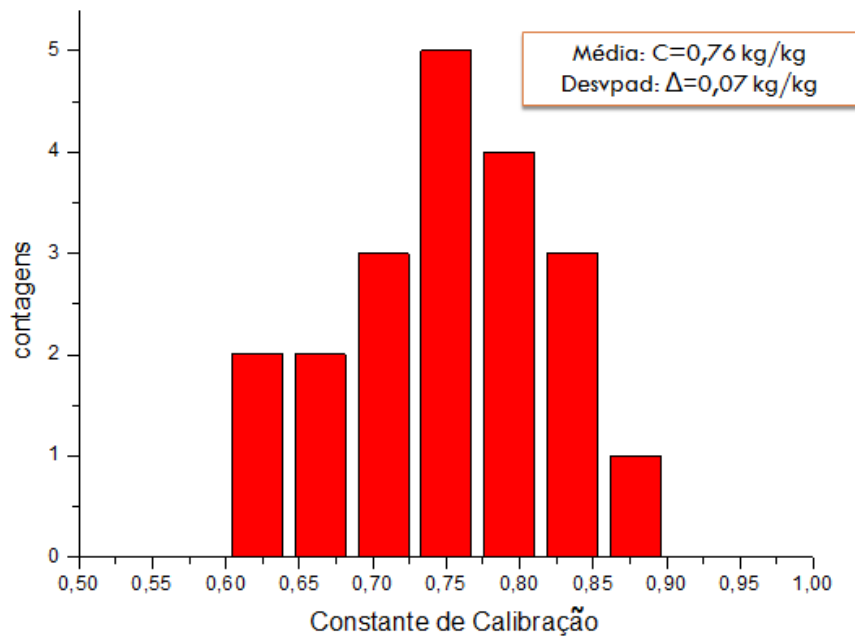


Figura 5: Histograma com as constantes de calibração obtidas com os dados das sondagens operacionais do aeroporto militar de Manaus e sondagens do projeto CHUVA, com a média entre as constantes e o desvio padrão da media. (tem como refazer o histograma com um “Bin” mais estreito?? Pra ficar mais parecido com uma gaussiana??)

O histograma da figura 5 contém as constantes de calibração obtidas com todos os dados das sondagens operacionais do aeroporto militar de Manaus e sondagens do projeto CHUVA, e como resultado final, obtivemos uma constante de calibração $C = 0,76(7)$ kg/kg. Este foi um bom resultado, com incerteza em torno de 9% para a constante de calibração.

4. Atividades Complementares.

Nestes 6 meses de projeto, estudei, através da bibliografia indicada, as bases do sensoriamento remoto através de sistemas lidar. Também neste semestre, cursei a disciplina “Meteorologia Física I” no Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP (IAG-USP), que trata de termodinâmica atmosférica e microfísica de nuvens, disciplina que considerei muito importante para minha vida acadêmica na área de física atmosférica.

5. Conclusões

Neste trabalho, conseguimos satisfatoriamente calibrar o sistema lidar-raman utilizando dados de sondagens, do ponto de vista de um trabalho de iniciação científica. Utilizamos as sondagens operacionais do aeroporto militar de Manaus, e mesmo sendo realizadas a 30 km de distancia do lidar, conseguimos constantes de calibração que eram compatíveis com as constantes obtidas com sondagens realizadas no mesmo sitio do lidar. A função de correlação mostrou funcionar bem nos ajustes das constantes, mas estas correções não foram muito efetivas em muitos casos, pois a homogeneidade do ar atmosférico tornava as outras incertezas envolvidas na calibração das constantes muito mais importantes no resultado final. (o que você tinha dito antes era que a correlação era sempre as 0z, ou seja, no mesmo horário da sondagem... não foi isso? Precisa escrever melhor esta ultima frase! Além disso, você não colocou um gráfico de uma destas funções de correlação)

Como resultado final, utilizamos 20 sondagens para obtermos um valor médio de 0,76(7) (unidades???? Acho que é g/kg não??) para a constante de calibração do sistema lidar-raman do projeto AEROCLIMA.

6. Referências

- [1] Whiteman, D., S. Melfi, and R. Ferrare, 1992: Raman lidar system for the easurement of water vapor and aerosols in the earth's atmosphere. *Appl Opt*, **31** (16), 3068-3082.
- [2] Melfi, S. H., 1972: Remote measurements of the atmosphere using raman scattering. *Appl. Opt.*, 11, 1288-1292.

- [3] Bosser, P., O. Bock, C. Thom, and J. Pelon, 2007: Study of the statistics of water vapor mixing ratio determined from raman lidar measurements. *Appl Opt*, **46** (23), 8170-8180, doi:10.1364/AO.46.008170.
- [4] Dionisi, D., F. C. G. L. Liberti, and F. Cardillo, 2010: Calibration of a multichannel water vapor raman lidar through noncollocated operational soundings: Optimization and characterization of accuracy and variability. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 27, 108-121.
- [5] Bosser, P. et al., 2010: A case study of using raman lidar measurements in high-accuracy gps applications. *J. Geod.*, 84, 251-265, doi:10.1007/s00190-009-0362-x.
- [6] Revercomb, H. et al., 2003: The arm program's water vapor intensive observation periods. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 84 (2), 217-236, doi:10.1175/BAMS-84-2-217.