

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE

CRAAM – Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais

KELY DORELY PADILLA HUAMÁN

**VARIABILIDADE DA OPACIDADE
SUBMILIMÉTRICA EM ESCALAS DE
MINUTOS**

São Paulo - Brasil

2021

KELY DORELY PADILLA HUAMÁN

**VARIABILIDADE DA OPACIDADE
SUBMILIMÉTRICA EM ESCALAS DE MINUTOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geospaciais da Universidade Presbiteriana Mackenzie como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências e Aplicações Geospaciais.

Orientador: Dr. CARLOS G. GIMÉNEZ DE CASTRO

São Paulo - Brasil

2021

H874v Huamán, Kely Dorely Padilla
Variabilidade da opacidadesubmilimétrica em escalas de minutos /
Kely Dorely Padilla Huamán

46 f.: il.; 30 cm
Bibliografia: f. 14-42

Dissertação (Mestrado em Ciências e Aplicações Geoespaciais), São Paulo, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Dr. Carlos Guilherme Gímenes de Castro.

1. Profundidade óptica atmosférica 2. Emissão em ondas sub-milimétricas 3. Método da brilhância . I. Castro, Carlos Guilherme Gímenes de; I. Orientador. II. Título.

CDD 537

Bibliotecária Responsável: Maria Gabriela Brandi Teixeira – CRB 8/6339

Folha de Identificação da Agência de Financiamento

Autor: Kely Dorely Padilla Huamán

Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Ciências e Aplicações Geoespaciais

Título do Trabalho: VARIABILIDADE DA OPACIDADE

SUBMILIMÉTRICA EM ESCALAS DE MINUTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio de ¹:

- CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
- CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
- FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
- Instituto Presbiteriano Mackenzie/Isenção integral de Mensalidades e Taxas
- MACKPESQUISA - Fundo Mackenzie de Pesquisa
- Empresa/Indústria:
- Outro:

¹ **Observação:** caso tenha usufruído mais de um apoio ou benefício, selecione-os.

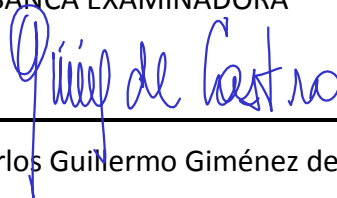
KELY DORELY PADILLA HUAMAN

VARIABILIDADE DA OPACIDADE SUBMILIMÉTRICA
EM ESCALA DE MINUTOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências e Aplicações Geoespaciais.

Aprovada em 16 de Agosto de 2021

BANCA EXAMINADORA



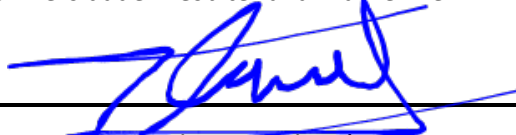
Prof. Dr. Carlos Guillermo Giménez de Castro

Universidade Presbiteriana Mackenzie



Prof. Dr. Paulo José de Aguiar Simões

Universidade Presbiteriana Mackenzie



Dr. Fernando Marcelo López

Universidad Nacional de San Juan (Argentina)

Deus porque apesar de não ter muito, tenho tudo.

Agradecimentos

Agradeço a Deus primeiro por nos permitir ter boa saúde apesar desta situação difícil da pandemia.

Ao Prof. Dr. Carlos Guillermo Giménez de Castro um agradecimento especial pela excelente orientação, pela paciência e compreensão, compartilhe seu conhecimento e termine meu trabalho.

Aos demais professores do programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais da Universidade Presbiteriana Mackenzie (CRAAM), para Profa. Dra. Adriana Benetti Marques Valio, Prof. Dr. Jean-Pierre Raulin, Profa. Dra. Emília Correia, Prof. Luiz Cláudio Lima Botti, Prof. Dr. Jean-Pierre Raulin, Prof. Dr. Luciano Silva e Dr. Prof. Sergio Szpigel. que em cada disciplina e em cada conselho, que compartilham seus conhecimentos para chegar até aqui.

Aos membros da banca examinadora desta pesquisa, Dr. Paulo José de Aguiar Simões e Dr. Fernando Marcelo López pelas dicas e sugestões que contribuíram ao desenvolvimento do trabalho.

Aos meus amigos e amigas Deysi, Julio, Claudio, Josue, Mirna, Jorge, Ray e Fabian pelo apoio. A todos os funcionários do CRAAM especialmente a Lucíola e Carol, por ajudarem sempre em todos os procedimentos de documentação.

Agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Universidade Presbiteriana Mackenzie pelo suporte financeiro durante a realização do curso de Pós-Graduação - Código de Financiamento 001. Também, baseia-se em dados adquiridos no Complejo Astronômico "El Leoncito", operado sob acordo entre o *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de la República Argentina* e as Universidades Nacionais de *La Plata, Córdoba e San Juan*.

Resumo

O vapor de água é a causa principal da atenuação atmosférica em altas frequências. A medição da profundidade óptica atmosférica (τ) é importante porque nos permite obter a verdadeira temperatura de brilho de um objeto astrofísico. Melo et al. (2005), determinaram a profundidade óptica atmosférica em ondas submilimétricas, usando como calibração a temperatura de brilhância do Sol. Usando o mesmo método Cornejo Espinoza (2017) estimou a opacidade para o período de 2006 e 2014. As medidas foram realizadas com o Telescópio Solar para Ondas Submilimétricas (SST), no Complejo Astronômico El Leoncito (CASLEO) nas frequências submilimétricas de 212 e 405 GHz. Neste trabalho vamos usar um novo método para calcular a variação da profundidade óptica atmosférica em escalas temporais de minutos a horas. Usaremos como parametro de entrada as opacidades determinadas por meio do método da brilhância ou de tipping, em dias em que o Sol não apresente nenhuma região ativa. O método pressupõe que toda variação de intensidade observada é devida a variações de τ na direção de observação.

Palavras-chaves: Profundidade óptica atmosférica, emissão em ondas sub-milimétricas, método da brilhância.

Abstract

Water vapor is the main cause of atmospheric attenuation at high frequencies. The measurement the atmospheric optical depth (τ) allows us to obtain the true brightness temperature of an astrophysical object. Melo et al. (2005), used the solar brightness temperature as a reference to obtain the Atmospheric optical depth at sub-millimeter waves. Cornejo Espinoza (2017) used the same method for a longer period from 2006 to 2014. All these measurements were made with the Solar Telescope for Sub-millimeter Waves (SST), at the El Leoncito Astronomical Complex (CASLEO) at the submillimeter frequencies of 212 and 405 GHz. In this work we will use a new method to calculate the variation the Atmospheric optical depth in time scales from minutes to hours. We will use the opacities determined by the brightness and tipping methods as an input parameter, on days when the Sun does not have any active region. The method assumes that any observed intensity variation is then due to τ fluctuations in the observing direction.

Keywords: Atmospheric optical depth, submillimeter wave emissions, solar brightness method.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Esquema que representa a radiação recebida pela superfície diferencial dA . Fonte: Apostila de RC por GIMÉNEZ-DE-CASTRO (2019)	16
Figura 2 – Esquema da transferência radiativa dentro de um volume diferencial cilíndrico. Fonte: Apostila de RC por GIMÉNEZ-DE-CASTRO (2019)	17
Figura 3 – Painel superior: Modelo de atmosfera plano-paralela para o cálculo da profundidade óptica em relação a direção ξ . Fonte: Apostila de RC por GIMÉNEZ-DE-CASTRO (2019). Painel inferior: Mostra um exemplo da determinação da profundidade óptica atmosférica em 212 e 405 GHz, usando a equação 2.15	20
Figura 4 – Exemplo de dois scan consecutivos. Credito: CORNEJO-ESPINOZA (2017)	20
Figura 5 – Exemplo de um perfil temporal do Scan Solar usado para a determinação da opacidade. Credito: CORNEJO-ESPINOZA (2017)	21
Figura 6 – Vista interna da redoma onde está instalado o SST. O telescópio instalado dentro da redoma consiste em uma antena Cassegrain, caixa com os receptores, montagem para rastreamento e fonte de alimentação elétrica (KAUFMANN et al., 2008)	25
Figura 7 – Vista interna da caixa contendo os radiômetros do SST. (1) Espelho rotativo que recebe a radiação do espelho secundário da antena e direciona para os receptores. Este espelho pode ter diversas posições, e também direcionar as fontes internas de calibração para os receptores. (2) Grade polarizadora que divide a radiação para os dois conjuntos de detectores. (3) Conjunto corneta e mixer operando em 405 GHz. (4) Conjunto corneta e mixers em 212 GHz. (5) Absorvedor que fornece a temperatura interna da caixa (ambiente). (6) Fonte de calor para calibração do sistema. (KAUFMANN et al., 2008).	26
Figura 8 – SST no disco solar, com o cluster formado pelos feixes 2, 3 e 4, e o feixe 1 distante, todos em 0,2 THz. No centro do cluster, o feixe 5, distante do feixe 6, ambos operando em 0,4 THz. (B): Conjunto cornetas e mixers, que operam em 0,4 THz (KAUFMANN et al., 2008)	27

Figura 9 – Perfil temporal do SST em que se pode apreciar uma calibração em temperatura, um mapa solar, os tipping (“scan tau”), um dos zénite para o horizonte, o segundo dos horizonte para o zénite, por último há scan solar.	28
Figura 10 –Um caso que foram considerados neste estudo data do 08/06/2008. Fonte: < https://www.solarmonitor.org >.	29
Figura 11 –A. Dias selecionados durante (2007-2010) anos sem manchas solares e B. Tabela de dados totais por ano, Sem manchas (SM) e Com manchas (CM).	29
Figura 12 –Exemplo para as duas frequências 212 GHz e 405 GHz do SST.	30
Figura 13 –Exemplo de uma hora de os 6 feixes para as quatro de frequências 212 GHz e dois de frequências 405 GHz.	30
Figura 14 –Variações da opacidade ao zenith $\delta\tau$ para os quatro canais em 212 GHz, derivadas de observações de 25 de janeiro de 2021.	33
Figura 15 –Diferença entre as aproximações $\delta\tau$ e $\delta\tau'$	34
Figura 16 –Correlação das profundidades ópticas atmosféricas para as duas frequências 212 GHz e 405 GHz obtidas com o método da brilhância do Sol.	36
Figura 17 –A opacidade atmosférica em 212 GHz derivada pelo método da brilhância do Sol no período de 2007 até 2010.	37
Figura 18 –Representa a variação total. Profundidades ópticas $\tau_{212} = 0,32$	38
Figura 19 –Representa a variação após eliminar uma tendência linear. profundidades ópticas $\tau_{212} = 0,32$	38
Figura 20 –Representa a variação total. Opacidade $\tau_{212} = 0,31$ e $\tau_{405} = 1,54$	40
Figura 21 –Representa a variação após eliminar uma tendência linear. Profundidade óptica $\tau_{212} = 0,31$ e $\tau_{405} = 1,54$	40
Figura 22 –Representa a variação total. Profundidade óptica $\tau_{212} = 0,11$ e $\tau_{405} = 0,53$	41
Figura 23 –Representa a variação após eliminar uma tendência linear. Profundidade óptica $\tau_{212} = 0,11$ e $\tau_{405} = 0,53$	42
Figura 24 –Representa a variação total após eliminar uma tendência linear. Profundidade óptica atmosférica. $\tau_{212} = 0,48$ e $\tau_{405} = 2,42$	43
Figura 25 –Representa a variação detrended. Profundidade óptica atmosférica $\tau_{212} = 0,48$ e $\tau_{405} = 2,42$	44

Lista de tabelas

Tabela 1 – Posição do espelho de calibração em temperatura	27
Tabela 2 – Correlações $\delta\tau_i \times \delta\tau_j$	39
Tabela 3 – Correlações $\delta\tau_i \times \text{PWV}$	39
Tabela 4 – Correlações $\delta\tau_i \times \delta\tau_j$	41
Tabela 5 – Correlações $\delta\tau_i \times \text{PWV}$	41
Tabela 6 – Correlações $\delta\tau_i \times \delta\tau_j$	42
Tabela 7 – Correlações $\delta\tau_i \times \text{PWV}$	42
Tabela 8 – Correlações $\delta\tau_i \times \delta\tau_j$	43
Tabela 9 – Correlações $\delta\tau_i \times \text{PWV}$	44

Sumário

1	Introdução	13
1.1	Objetivos	14
2	Profundidade óptica atmosférica e Equação de Transferência Radiativa	15
2.1	Métodos de obtenção de profundidade óptica atmosférica	19
2.2	Antecedentes	22
3	Telescópio Solar para Ondas Submilimétricas - SST	24
3.1	Metodología	27
3.1.1	Rotina de dados do SST	27
3.1.2	Base de dados do Solar Monitor	28
4	Análise de dados	31
4.1	Solução por aproximações	32
5	Resultados e discussão	36
5.1	Variação de τ observada no dia 17 de junho de 2007.	37
5.2	Variação de τ observada em 17 de junho de 2007 ao meio dia.	39
5.3	Variação de τ observada em 26 de março de 2011 de manhã.	41
5.4	Variação de τ observada em 20 de março de 2007 ao meio dia.	43
6	Conclusões	45
	Referências	46

Capítulo 1

Introdução

O Sol, estrela ao redor da qual a Terra orbita, e cujo energia permite a vida na Terra da forma como a conhecemos, apesar de apresentar um comportamento estável, emissão de energia, em períodos menores de tempo tem variações sutis do brilho que forma atribuídas a estruturas observadas sobre a sua superfície: as manchas e, de forma mais abrangente e moderna, as regiões ativas. As características básicas destas estruturas começaram a ser monitoradas em 1610, e com a evolução da tecnologia e da ciência cresceu também as diferentes formas em que podiam ser vistas em observações. Desde então a busca por explicar e entender o comportamento do Sol e de seus ciclos vem sendo estudada de forma constante pela ciência.

Atualmente com os diversos instrumentos e o compartilhamento de dados com a comunidade científica se tornam cada vez mais abrangentes as abordagens das pesquisas, assim como se levanta a possibilidade de análises mais completas, capazes de descrever desde o surgimento até os resultados finais diretos e indiretos.

As observações astronômicas são feitas a partir do solo restritas a janelas atmosféricas, onde a atmosfera é parcialmente transparente. Para comprimentos de ondas sub-milimétricos, o vapor de água é a principal causa de atenuação e, em menor grau outras substâncias químicas, como oxigênio molecular (O_2) e ozônio (O_3) ([J.W. WATERS, 1976](#); [ULICH, 1980](#)). A profundidade óptica atmosférica depende da frequência e existem linhas moleculares de água que atenuam quase completamente a intensidade e também depende do ângulo de elevação da fonte observada e das condições meteorológicas globais e locais.

[MELO et al. \(2005\)](#) e [CORNEJO-ESPINOZA \(2017\)](#) estudaram a variabilidade da profundidade óptica atmosférica nas frequências de 212 e 405 GHz ao longo dos anos, verificando da sazonalidade de verão dos valores. Nosso foco agora é saber quão variável é a profundidade óptica atmosférica no mesmo dia. Vamos desenvolver um método que permita determinar essa variação em escalas de minutos a horas a partir de um valor inicial medido.

1.1 Objetivos

Objetivos Gerais:

1. Compreender os processos atmosféricos que alteram a intensidade observada pelo SST.
2. Aprender as técnicas e ferramentas de manipulação dos dados do SST, principalmente para determinar a absorção atmosférica.

Objetivos Particulares:

1. Desenvolver um método consistente para derivar as flutuações "rápidas" da profundidade óptica atmosférica para as frequências de 212 e 405 GHz no CASLEO.
2. Verificar as dependências das flutuações de profundidade óptica atmosférica com as condições de observação (temperatura, pressão, umidade, época do ano, etc)

Capítulo 2

Profundidade óptica atmosférica e Equação de Transferência Radiativa

A observação de corpos celestes é alterada pela redução ou atenuação no fluxo da radiação que atravessa nossa atmosfera. A região do espectro correspondente à faixa submilimétrica é muito atenuada na atmosfera neutra da Terra, principalmente pelo vapor de água. Devido a esta absorção as observações dos corpos celestes em frequências elevadas (acima de 100 GHz) devem ser feitas em locais secos e altos. A transmissão atmosférica nas frequências de operação do SST é particularmente crítica no Complexo Astronômico *El Leoncito* (CASLEO) sítio localizado em Argentina, na região dos 2550 metros de altitude, com média de 2 a 3 mm de vapor de água precipitável. Outras substâncias que contribuem em menor grau para absorção de radiação são o dióxido de carbono, o ozônio, o óxido nítrico e o monóxido de carbono.

A análise de um campo de radiação geralmente exige que consideremos a quantidade de energia radiante, dW em um intervalo de frequência especificado ($\nu, \nu + d\nu$) que é transportado através de um elemento de área (dA) como:

$$dW = I_\nu(\theta, \phi) \cos \theta d\Omega dA d\nu \quad (2.1)$$

- dW : potência infinitesimal, watts.
- dA : área infinitesimal da superfície, m^2 metros.
- $d\Omega$: ângulo sólido infinitesimal do céu. ($= \sin \theta d\theta d\phi$), sr
- $d\nu$: elemento infinitesimal da largura de banda, Hz.
- dt : intervalo de tempo.
- θ : ângulo entre a radiação incidente e o zênite, rad.
- I_ν : intensidade específica, $[I_\nu] = W m^{-2} H z^{-1} s r^{-1}$

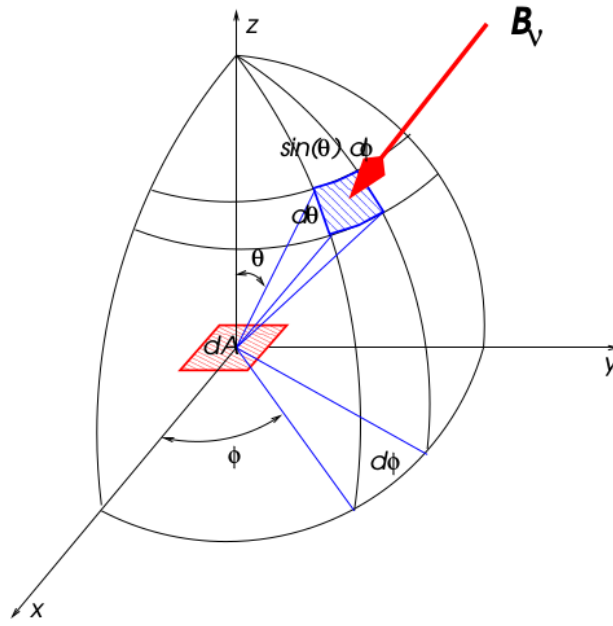


Figura 1 – Esquema que representa a radiação recebida pela superfície diferencial dA . Fonte: Apostila de RC por GIMÉNEZ-DE-CASTRO (2019)

Será considerada a emissão de um volume infinitesimal, tomando a diferença entre energia que sai I_s e a energia que entra I_o . Uma quantidade dI_ν^e de radiação é criada, sendo proporcional ao comprimento do cilindro ds .

$$dI_\nu^e(\theta, \phi) = j_\nu(\theta, \phi)ds, [j_\nu] = Wm^{-3}str^{-1}Hz^{-1} \quad (2.2)$$

Na equação. 2.2 j_ν representa a emissividade do meio por unidade de volume. A absorção de energia pode ser calculada da seguinte maneira

$$dI_\nu^a = -\kappa_\nu I_o ds, [\kappa_\nu] = m^{-1} \quad (2.3)$$

κ_ν representa a absorção linear do meio, medida em m^{-1} . Das equação 2.2 e 2.3 se obtém

$$dI_\nu = (j_\nu - \kappa_\nu I_\nu)ds,$$

$$\frac{dI_\nu}{\kappa_\nu ds} = \frac{j_\nu}{\kappa_\nu} - I_\nu$$

Define-se uma grandeza física chamada profundidade óptica

$$\tau_\nu = \int \kappa_\nu ds, \quad d\tau_\nu = \kappa_\nu ds \quad (2.4)$$

Substituindo na equação 2.3

$$\frac{dI_\nu}{d\tau} = S_\nu - I_\nu, [S_\nu] = [I_\nu] = Wm^{-2}str^{-1}Hz^{-1} \quad (2.5)$$

S_ν é chamada de função fonte e representa a emissão do meio

$$S_\nu(\theta, \phi) = I_\nu(\theta, \phi) + \frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = \frac{j_\nu}{\kappa_\nu} \quad (2.6)$$

Podemos definir:

$$\mathcal{I}_\nu = I_\nu e^{\tau_\nu}$$

e calculamos sua derivada



Figura 2 – Esquema da transferência radiativa dentro de um volume diferencial cilíndrico. Fonte: Apostila de RC por GIMÉNEZ-DE-CASTRO (2019)

$$\begin{aligned} \frac{d\mathcal{I}_\nu}{d\tau_\nu} &= \frac{d}{d\tau_\nu} [I_\nu e^{\tau_\nu}] = \frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} e^{\tau_\nu} + I_\nu e^{\tau_\nu} \\ \left[\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} + I_\nu \right] e^{\tau_\nu} &= S_\nu e^{\tau_\nu} \\ \frac{d\mathcal{I}_\nu}{d\tau_\nu} &= S_\nu \end{aligned} \quad (2.7)$$

Da equação 2.7 onde definimos S_ν de maneira semelhante a I_ν se resolve

$$\begin{aligned} \mathcal{I}(\tau_\nu) &= \mathcal{I}_\nu(0) + \int_0^{\tau_\nu} S_\nu(\tau'_\nu) d\tau'_\nu \\ I(\tau_\nu) &= I_\nu(0) e^{-\tau_\nu} + \int_0^{\tau_\nu} S_\nu(\tau'_\nu) e^{-(\tau_\nu - \tau'_\nu)} d\tau'_\nu \end{aligned} \quad (2.8)$$

a equação 2.8 é a expressão integral da transferência radiativa, se S_ν é constante a integral fica

$$I_\nu(\tau_\nu) = I_\nu(0) e^{-\tau_\nu} + S_\nu(1 - e^{-\tau_\nu}). \quad (2.9)$$

Quando $\tau_\nu \ll 1$, o meio é dito opticamente fino, nesse caso $e^{-\tau_\nu} \simeq 1$ e a equação, 2.9

$$I_\nu(\tau_\nu) \simeq I_\nu(0). \quad (2.10)$$

Quando $\tau_\nu \gg 1$, então $e^{-\tau_\nu} \simeq 0$,

$$I_\nu(\tau_\nu) \simeq S_\nu(\tau_\nu). \quad (2.11)$$

Supondo uma atmosfera homogênea, a dependência da profundidade óptica com a direção de observação passa a ser um problema geométrico. Se κ_ν é constante, $\tau = \kappa_\nu L$, com L o comprimento da atmosfera terrestre na direção de observação. Vamos supor que

a atmosfera é plana. A Figura superior 3 mostra um esquema desta situação, a atmosfera fica contida entre um limite superior (espaço exterior) e um limite inferior (chão). Na prática, a altura máxima da atmosfera $H \simeq 10\text{km}$. Isto não significa que ali acaba, mas que os efeitos das camadas superiores para a profundidade óptica podem ser desprezados. Para calcular $\tau_\nu(\zeta)$, podemos ver que

$$L = \frac{H}{\text{sen}\zeta}$$

Onde ζ o ângulo de elevação. Logo

$$\tau_\nu(\zeta) = \kappa_\nu L = \frac{\kappa_\nu H}{\text{sen}\zeta} = \frac{\tau_\nu(90)}{\text{sen}\zeta} = \frac{\tau_\nu}{\text{sen}\zeta} \quad (2.12)$$

$\tau_\nu(90)$ é a profundidade óptica ao Zénite e a partir de agora usaremos o símbolo τ_ν ou simplesmente τ para nos referirmos à profundidade óptica ao Zénite. A atmosférica \mathcal{T} na direção ζ será então

$$\mathcal{T}(\zeta) = e^{-\tau_\nu/\text{sen}\zeta}, \quad (2.13)$$

e a emissão do céu

$$I_\nu^C(\zeta) = B_\nu^P(T)(1 - e^{-\tau_\nu/\text{sen}\zeta}). \quad (2.14)$$

Onde $B_\nu^C(\zeta)$ deve ser calculado por meio da aproximação de Rayleigh-Jeans (RJ) para radiação de corpo negro

$$B_\nu^P = \frac{2\kappa_B T}{\nu} c^2 \nu^2,$$

onde

B : brilho ($\text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1} \text{sr}^{-2}$)

κ_B : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{JK}^{-1}$)

c : velocidade da luz ($3 \times 10^8 \text{ m/s}^{-1}$)

T : temperatura, (K)

ν : frequência, (Hz)

Adotando-se a solução de atmosfera plano-paralela, e que para a faixa de frequências mm e sub-milimétrica podemos aplicar a aproximação de Rayleigh-Jeans para radiação de corpo negro, chega-se à equação onde se relaciona a temperatura e a profundidade óptica

$$T_{obs} = T_{sky}(1 - e^{-\tau/\text{sen}\zeta}) + T_{off} \quad (2.15)$$

Onde T_{obs} é a temperatura observada pelo aparelho, T_{sky} é a temperatura média do céu, T_{off} é a temperatura de “offset” (uma temperatura residual que resulta de contribuições parasitas) (KRAUSS, JOHN. D., 1966; MELO et al., 2005).

Apresentamos agora a equações da transferência radiativa

$$T_{obs} = T_{source}e^{-\tau_\nu/\text{sen}\zeta} + T_{sky}(1 - e^{-\tau/\text{sen}\zeta}) \quad (2.16)$$

onde T_{obs} é a temperatura observada, T_{source} é a temperatura da fonte observada fora da atmosfera e T_{sky} a temperatura da atmosfera. Para obter as devidas correções sobre o brilho, fluxo e a temperatura. Dessa forma, se utilizarmos a equação da transferência radiativa aplicada dentro de uma nuvem, que apenas absorva a radiação emitida pela fonte em uma dada direção, que pode ser qualquer uma do espaço tridimensional (x, y ou z), observaremos certa atenuação (em unidades de m^{-1}), que é a constante de atenuação do meio.

2.1 Métodos de obtenção de profundidade óptica atmosférica

Existem três métodos mais comuns para medir a profundidade óptica atmosférica:

1. Varredura do céu em elevação ou *tipping*:

A opacidade atmosférica é derivada do céu, medindo a temperatura do céu em diferentes ângulos de elevação (DICKE et al., 1946). A equação 2.15 é utilizada para o cálculo da profundidade óptica pelo método do Tipping. Além disso, este método supõe que a atmosfera é homogênea e a profundidade óptica a mesma para qualquer direção de observação. Ademais, dependendo do instrumento a usar pode demandar muito tempo realizar a medida. Por outra parte, tem a vantagem de não precisar da calibração em temperatura possibilitando trabalhar diretamente em unidades cruas de observação volts ou unidades digitais arbitrárias (ADC: Análogo to Digital Units), eliminando alterações introduzidas no próprio processo de calibração. Um exemplo dessa determinação é mostrado na Figura. 3

2. Método de Extinção (conhecido também como o método “absoluto”):

Em função do a atenuação é derivada da atenuação do sinal solar (ou lunar) opacidade (MELO et al., 2005), conforme mostrado na figura 4.

Para dois ângulos de elevação, a profundidade óptica.

$$\tau = \frac{\ln\left(\frac{\Delta ADC_1}{\Delta ADC_2}\right)}{(1/\text{sen}(\zeta_2)) - (1/\text{sen}(\zeta_1))} \quad (2.17)$$

sendo ΔADC_1 e ΔADC_2 a diferença de nível Sol-céu de cada *Scan Solar*, τ [nepers] é a profundidade óptica atmosférica e ζ [graus] é o ângulo de elevação, respectivamente. No entanto, este método apresenta duas limitações principais: as observações precisam ser feitas com baixos ângulos de elevação, as diferenças nas temperaturas da antena se tornam muito pequenas para medições precisas e para grandes condições de atenuação, as diferenças observadas na temperatura da antena solar, adicionando grandes erros nas determinações. A maior vantagem do método é que permite trabalhar em unidades cruas, sem precisar da calibração em temperatura ver fig.4.

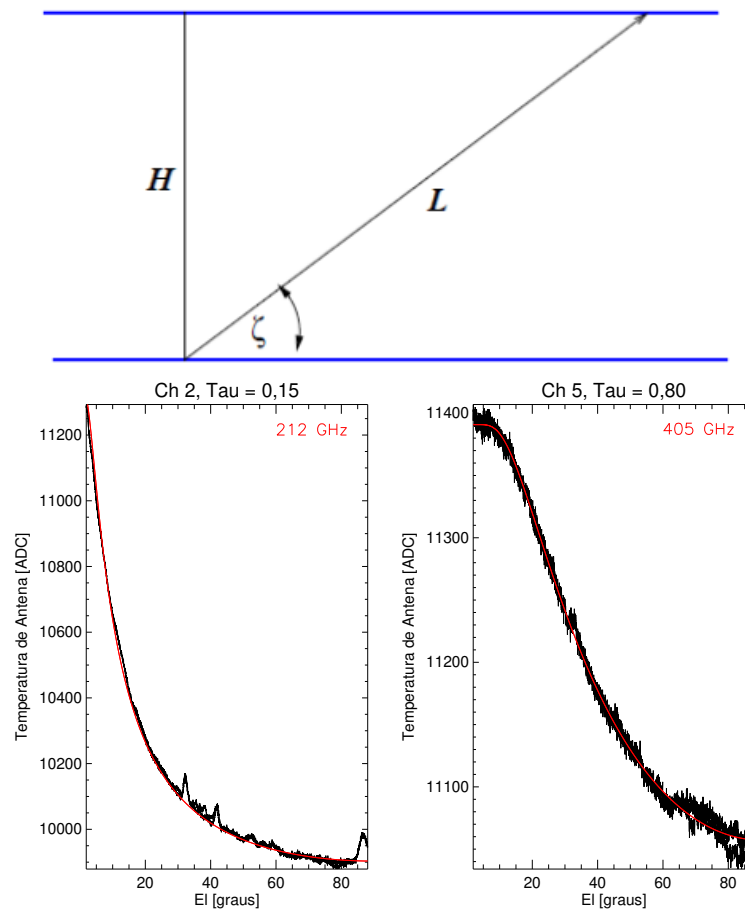


Figura 3 – Painel superior: Modelo de atmosfera plano-paralela para o cálculo da profundidade óptica em relação a direção ξ . Fonte: Apostila de RC por [GIMÉNEZ-DE-CASTRO \(2019\)](#). Painel inferior: Mostra um exemplo da determinação da profundidade óptica atmosférica em 212 e 405 GHz, usando a equação 2.15

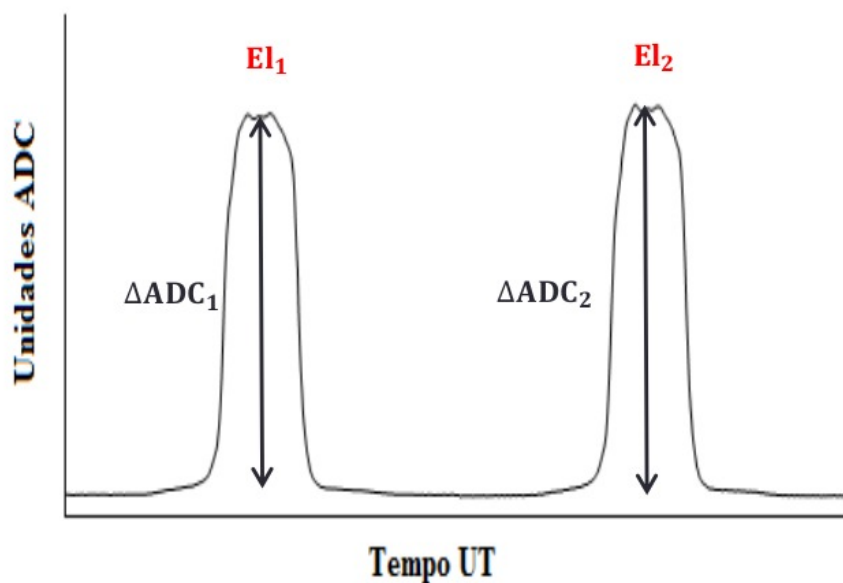


Figura 4 – Exemplo de dois scan consecutivos. Crédito: [CORNEJO-ESPINOZA \(2017\)](#)

3. Brilhôncia do Sol

MELO et al. (2005) propõe um método muito prático para determinar a opacidade atmosférica (τ_ν) em ondas sub-milimétricas. Assim, a τ_ν pode ser determinada a partir da diferença da temperatura da antena (ΔT_{ant}) observada do Sol para qualquer ângulo de elevação ver figura 5. Esse parâmetro é definido como o produto da temperatura de brilho solar T_\odot , eficiência do feixe do radiotelescópio η , entre a antena e a fonte:

$$\Delta T_{ant} = \eta T_\odot. \quad (2.18)$$

Então temperatura observada é

$$T_{obs} = \eta T_\odot \exp \left[\frac{\tau}{\sin(\xi)} \right]. \quad (2.19)$$

Uma vez que temos os dados calibrados, isolando da equação da acima “ τ_ν ”, a opacidade é dada por:

$$\tau_\nu = -\sin(\xi) \ln \left(\frac{T_{obs}}{\eta T_\odot} \right) \quad (2.20)$$

Assim, como a eficiência do feixe η só são considerados os dias de observação do céu aberto, o produto ηT_\odot deve ser determinada em dias com opacidades muito baixas usando tipping. Uma vez conhecido este produto, a equação 2.20 permite estimar τ .

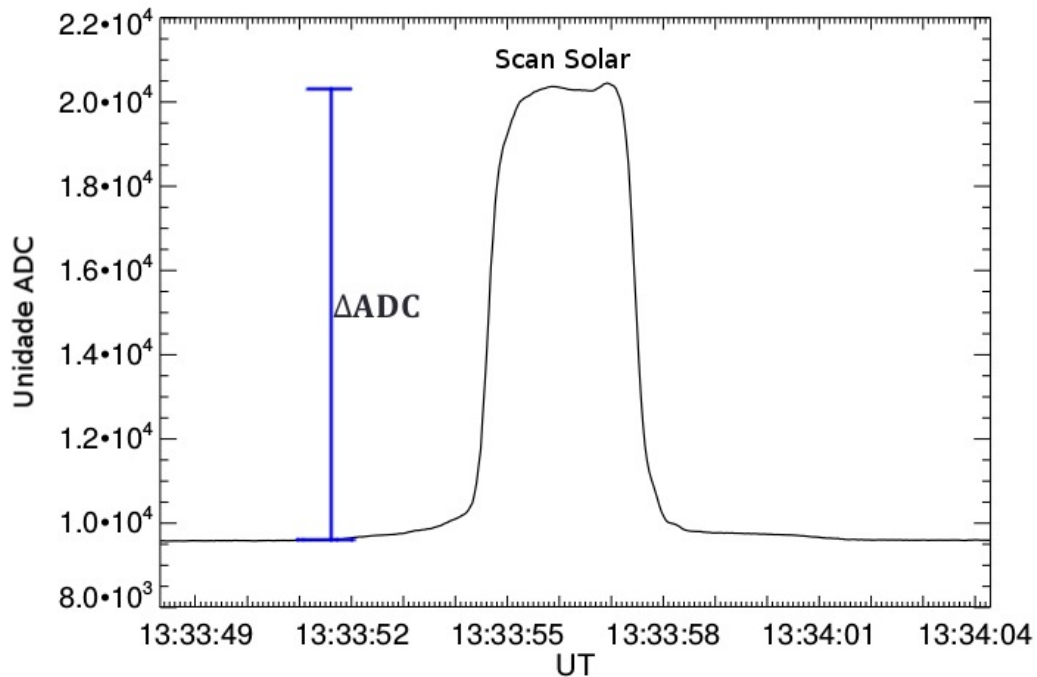


Figura 5 – Exemplo de um perfil temporal do Scan Solar usado para a determinação da opacidade. Credito: CORNEJO-ESPINOZA (2017)

2.2 Antecedentes

MELO et al. (2005) conduziram o primeiro levantamento estatístico da opacidade submilimétrica no CASLEO. Eles mostraram a dependência sazonal dos valores de “ τ ” e acharam valores médios de 3,0 – 3,7 mm de Precipitable Water Vapour (PWV) usando dados de 212 GHz e 2,4 – 4,2 mm dados de 405 GHz, derivando uma razão entre frequências de 5,5 que é muito menor ao esperado pelos modelos atmosféricos, fato que os autores atribuem à transparência submilimétrica do céu do CASLEO.

CASSIANO et al. (2018) analisaram a correlação entre as medidas de profundidade óptica atmosférica PWV para 212 e 405 GHz, no local de Complexo astronômico El Leoncito (CASLEO), para o período de 2011 a 2013. Um coeficiente de correlação 0.98 muito significativa foi encontrada para todo o período. Resultados semelhantes foram encontrados para a correlação, quando analisados individualmente, ano a ano. A descoberta sugere que a correlação entre PWV e a emissão observada em 212 GHz pode ser usada como um método indireto para estimar a PWV, quando as medições diretas não estiverem disponíveis, se os dados de profundidade óptica de 212 GHz estiverem disponíveis e vice-versa .

Os dados obtidos entre Fevereiro de 2002 e Outubro de 2015, por meio do SST, e utilizando o método da brilhância do Sol, comparado com outras técnicas, permite determinar a opacidade até valores consideravelmente altos, e somente depende do único parâmetro conhecido como o produto P, que é definido como a temperatura de brilho do Sol (T_{\odot}) vezes a eficiência do feixe (η). Apesar, das duas quantidades não serem bem conhecidas, o valor de P é constante. Os valores médios do produto ηT_{\odot} foram calculados, para os 6 feixes do SST, considerando na análise do céu aberto com baixa opacidade e com o critério que a dispersão das medidas deve ser 10% em 212 GHz e 15% em 405 GHz. A opacidade atmosférica em 212 GHz em função do PWV no CASLEO nos períodos de 2011 a 2013, devido que mostram uma excelente correlação entre ambas quantidades ($\beta_{212} = 0,0698$ [Nepers/mm] e $\beta_{405} = 0,48$ [Nepers/mm]) (CORNEJO-ESPINOZA, 2017)

VALLE-SILVA et al. (2020) Apresentam as características estatísticas da absorção atmosférica a 45 e 90 GHz no "El Leoncito", para os anos de 2012 e 2013, e encontram uma relação entre o conteúdo do vapor de água precipitável e a profundidade óptica ao zênite τ (relação Gaut – Reifenstein) para ambas as frequências. O resultado é de extrema importância, pois permite confirmar a forte dependência da profundidade óptica com o vapor de água, relatado anteriormente em frequências submilimétricas (CASSIANO et al., 2018), e é um fato importante a ser considerado para a construção de modelos atmosféricos em CASLEO. Foi demonstrado que o modelador atmosférico ATM 2009, quando aplicado ao local de "El Leoncito", fornece resultados em concordância razoável a 45 GHz quando a PWV <5 mm, mas mostra discrepâncias sistemáticas a 90 GHz. Concluindo, o CASLEO é um local para observações astronômicas com características semelhantes a outros locais

da mesma altitude, mas que parece mostrar um melhor desempenho contra a atenuação atmosférica na faixa milimétrica (<120 GHz)

Capítulo 3

Telescópio Solar para Ondas Submilimétricas - SST

Para realizar nosso estudo, utilizamos os dados obtidos pelo Telescópio Solar para Ondas Submilimétricas (SST). Este instrumento foi o primeiro rádio-telescópio “concebido para estudar continuamente o ainda inexplorado espectro submilimétrico de emissões solares em condições calmas, quiescentes e explosivas” (KAUFMANN *et al.*, 2001). O instrumento está localizado na província de San Juan, Argentina, na região dos Andes a 2.550 m de altitude no Complexo Astronômico "El Leoncito"(CASLEO). O projeto iniciado em 1994, teve sua primeira observação em 1 de maio de 1999, e é fruto de uma parceria entre o Centro de Rádio-Astronomia e Astrofísica Mackenzie (CRAAM) e o CASLEO. SST opera em duas frequências: 212 e 405 GHz, ou seja nos comprimentos de onda de 1,42 e 0,74 mm respectivamente (KAUFMANN *et al.*, 2008).

O SST está instalado sobre uma base de concreto, dentro de uma redoma de Gore-Tex com transmitância de 92 e 96 % em 0,2 e 0,4 THz, respectivamente, atuando como filtro e protegendo a antena da radiação visível e infravermelha próxima. Consiste em uma antena do tipo Cassegrain em uma montagem alt-azimutal com refletor primário de 1,5 m de diâmetro, razão focal $F/D = 8$, e superfície aluminizada com rugosidade quadrática média superficial (r.m.s.) de 20 microns. O sistema de detecção é formado por radiômetros heteródinos, sendo que os dois receptores que operam em 0,740 mm, produzam feixes com Half Power Beam Width (HPBW) de aproximadamente 2' de arco; e os quatro receptores que operam em 1,415 mm (212 GHz), produzem feixes com HPBW de aproximadamente 4' de arco.

O sistema para detecção de radiação está instalado dentro de uma caixa fechada, no foco do refletor secundário da antena. A caixa está apresentada na Figura 6, com os detectores heteródinos, conjunto de cornetas e mixers e o sistema interno de calibração. A caixa contendo os receptores está instalada na parte posterior da antena, fixa em um posicionador de precisão alt-azimutal dirigido por um controlador com encoder com precisão

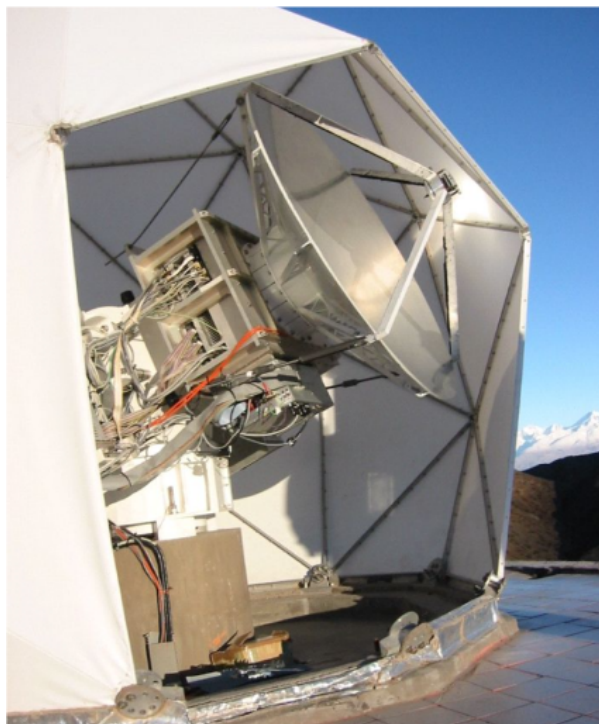


Figura 6 – Vista interna da redoma onde está instalado o SST. O telescópio instalado dentro da redoma consiste em uma antena Cassegrain, caixa com os receptores, montagem para rastreamento e fonte de alimentação elétrica (KAUFMANN et al., 2008)

de $\pm 1,8$ segundos de arco.

Os radiômetros operam simultaneamente e estão localizados no plano focal da antena. Os feixes 2, 3 e 4 em 212 GHz estão parcialmente sobrepostos, formando um conjunto a 9 minutos de arco distantes do feixe 1, também operando em 212 GHz. O feixe 5 está localizado no centro desse cluster, distante de 9 minutos de arco do feixe 6, ambos em 405 GHz. Assim, os feixes 1 e 6 estão apontando para uma direção fora da região de interesse (ativa), servindo como sinal de referência e também utilizados para técnicas de calibração para o tratamento dos dados referentes à radiação recebida nos feixes sobre a região ativa. Na figura 7.

O SST monitora a atividade solar diariamente, obtendo dados que representam a intensidade da radiação incidente em função do tempo. A cada intervalo de 5 ms, os seis radiômetros registram a intensidade média em unidades que são linearmente proporcionais à potência recebida, e armazenadas digitalmente em unidades de ADCs (Analog to Digital Units) diretamente proporcionais à voltagem.

O SST gera diariamente 3 tipos de arquivos de dados:

- **Subintegrados:** são arquivos gravados de 10 minutos de observação contendo dados com resolução temporal de 5 ms (time bin). São chamados de dados *fast*.
- **Integrados:** são arquivos gravados de 1 hora de observação contendo dados com

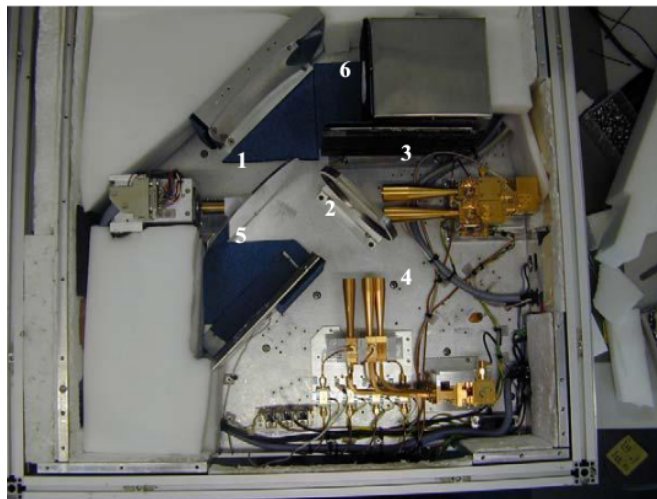


Figura 7 – Vista interna da caixa contendo os radiômetros do SST. (1) Espelho rotativo que recebe a radiação do espelho secundário da antena e direciona para os receptores. Este espelho pode ter diversas posições, e também direcionar as fontes internas de calibração para os receptores. (2) Grade polarizadora que divide a radiação para os dois conjuntos de detectores. (3) Conjunto corneta e mixer operando em 405 GHz. (4) Conjunto corneta e mixers em 212 GHz. (5) Absorvedor que fornece a temperatura interna da caixa (ambiente). (6) Fonte de calor para calibração do sistema. (KAUFMANN et al., 2008).

resolução temporal de 40 ms. São chamados de dados *intg*.

- **Auxiliares:** são arquivos diários com dados gerados a cada 1 s e representam a média temporal dos valores registrados nos arquivos tipo *fast* a cada 1 s. Adicionam também outras informações relativas ao processo de calibração e possuem a duração máxima de 1 dia. São chamados de dados *instr*.

Os dados para realizar este trabalho foram tomados dos arquivos tipo integrados. Estes arquivos contêm registros em binário com diversos campos importantes: além da intensidade em ADCs, pode-se obter o tempo da leitura e a direção de observação em coordenadas angulares, Azimute (Az) e Elevação (El), registrados em unidades de miligráus. Estes valores são fornecidos pelo sistema de apontamento cuja taxa de comando e amostragem é de 50 ms. Dentro desses registros, alguns parâmetros da observação são definidos. O modo de operação (*opmode*), representado por um byte (8 bits), o alvo (*target*), representado por 5 bits. Estes 5 bits fazem parte de um byte em sua posição menos significativa. Os outros 3 bits, mais significativos, representam a posição do espelho de calibração em temperatura. Estes parâmetros são apresentados na tabela 1

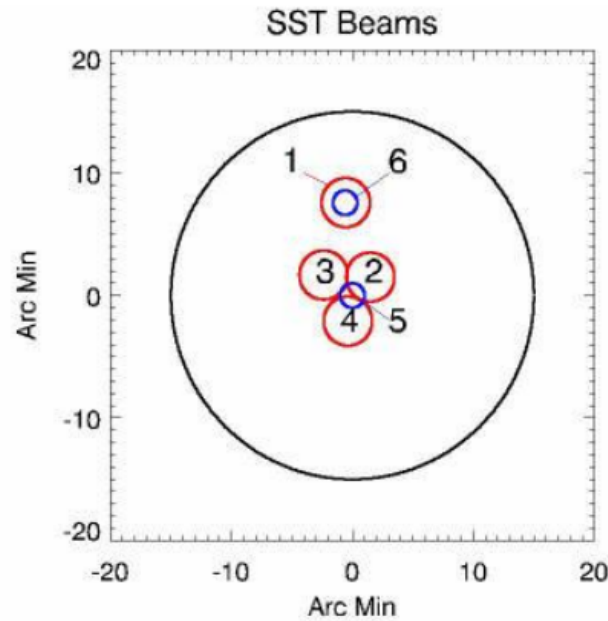


Figura 8 – SST no disco solar, com o cluster formado pelos feixes 2, 3 e 4, e o feixe 1 distante, todos em 0,2 THz. No centro do cluster, o feixe 5, distante do feixe 6, ambos operando em 0,4 THz. (B): Conjunto cornetas e mixers, que operam em 0,4 THz (KAUFMANN et al., 2008)

Modo: Descrição	Alvo: Descrição	Posição do Espelho de calibração
0: tracking	0: Céu	Decimal Binário: Descrição
1: Mapa em AR-Declinação	2: Vênus	0 000: antena
2: Mapa em Azimut-Elevação	4: Marte	1 001: Fonte calibradora fria
3: Mapa Radial	5: Jupiter	2 010: Fonte Calibradora quente
4: Intermeio entre varredura de un mapa	10: Lua	7 111: indefinido
5: varredura em azimute	11: Sol (centro do disco)	
10: scan de céu (tipping)	12: Região Ativa	
99: indefinido	13: Estrela	
	20: Beacon	
	31: indefinido	

Tabela 1 – Posição do espelho de calibração em temperatura

3.1 Metodología

3.1.1 Rotina de dados do SST

Durante um dia de observação, o SST realiza algumas rotinas observacionais como: calibração da temperatura, mapas solares, scan tau e scan azimuth, como é ilustrado na Fig. 9.

A conversão para temperatura é feita (como ilustrada na Fig. 9) usando duas fontes calibradoras quando as cornetas do SST são iluminadas por uma fonte interna fria ($T_{Cold} \approx 300$ K) e por uma fonte interna quente ($T_{Hot} \approx 430$ K). Deste modo, o coeficiente

de calibração para cada feixe é determinado pela seguinte expressão:

$$K = \frac{T_{Hot} - T_{Cold}[ADC]}{T_{Hot} - T_{Cold}[K]} = \frac{\Delta T_{ADC}}{\Delta T} [ADC/K] \quad (3.1)$$

onde ΔT_{ADC} é a diferença dos sinais ao apontar as fontes T_{Hot} e T_{Cold} em ADC e ΔT a diferença das temperaturas das duas fontes calibradoras T_{Hot} e T_{Cold} expressa em graus Kelvin. A opacidade atmosférica no CASLEO em 212 e 405 GHz é medida em media três vezes por dia, usando o método de tipping.

Para o presente estudo, as opacidades atmosféricas foram determinadas mediante a ferramenta *fittau*, que permite ajustar uma curva conforme a equação 2.15 ao *tipping* observado. Essa análise foi feita em dias em que o Sol não apresentava atividade (Sol calmo) no período de observação 2007 - 2010.

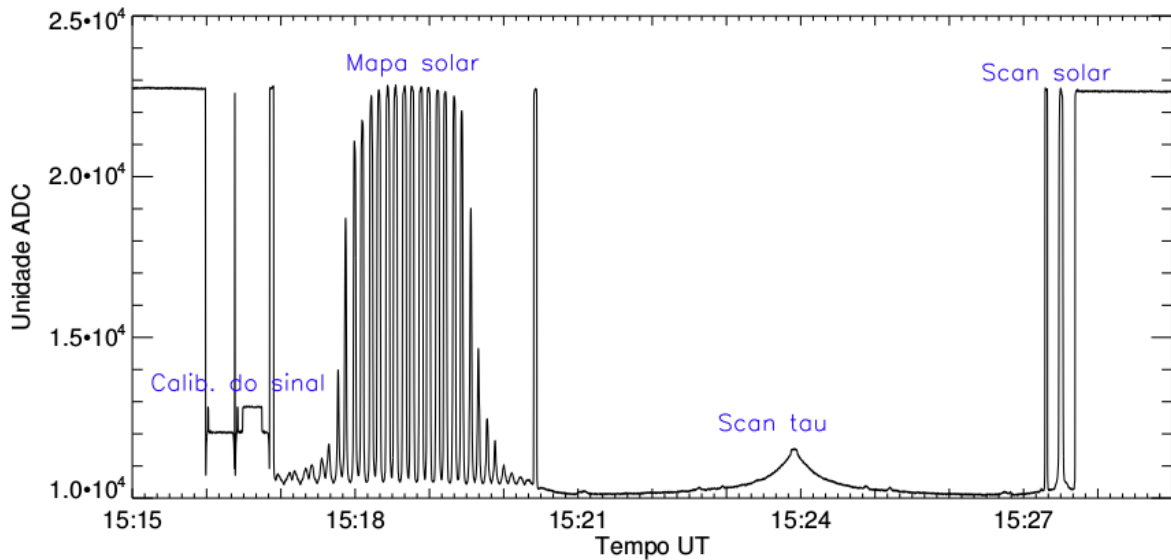


Figura 9 – Perfil temporal do SST em que se pode apreciar uma calibração em temperatura, um mapa solar, os tipping (“scan tau”), um dos zênite para o horizonte, o segundo dos horizonte para o zênite, por último há scan solar.

3.1.2 Base de dados do Solar Monitor

Neste estudo é utilizado os dados fornecidos pelo Solar Monitor¹. O primeiro passo foi procurar dias sem atividade solar entre 2007 e 2010. Um exemplo de caso é mostrado na figura 10.

Para os dias selecionados no banco de dados do Solar Monitor onde o Sol esta calmo (ou seja sem atividade solar), e da base de dados obtida do SST, nota-se que os dados registrado pelo SST no ano 2009 mostram mais dados para as condições de sol calmo,

¹ <<https://www.solarmonitor.org/>>

onde atingi-ou a seu ponto mínimo sem manchas solares (como ilustrado na figura 11. Esses dados foram compilados no linguagem de programação de IDL.

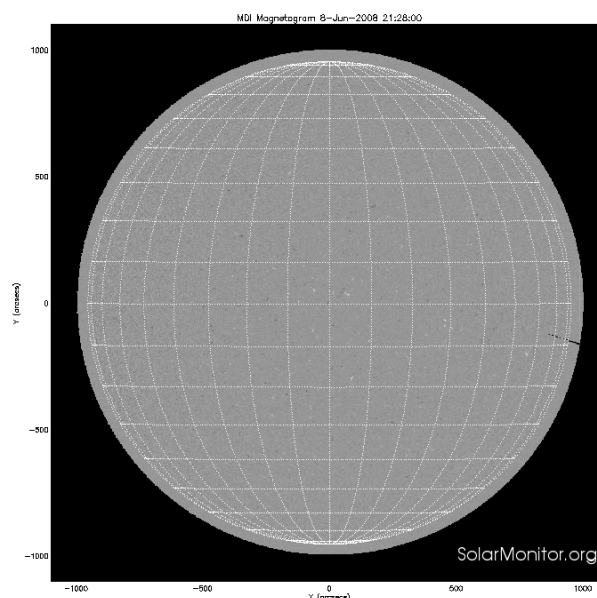


Figura 10 – Um caso que foram considerados neste estudo data do 08/06/2008. Fonte: <<https://www.solarmonitor.org>>.

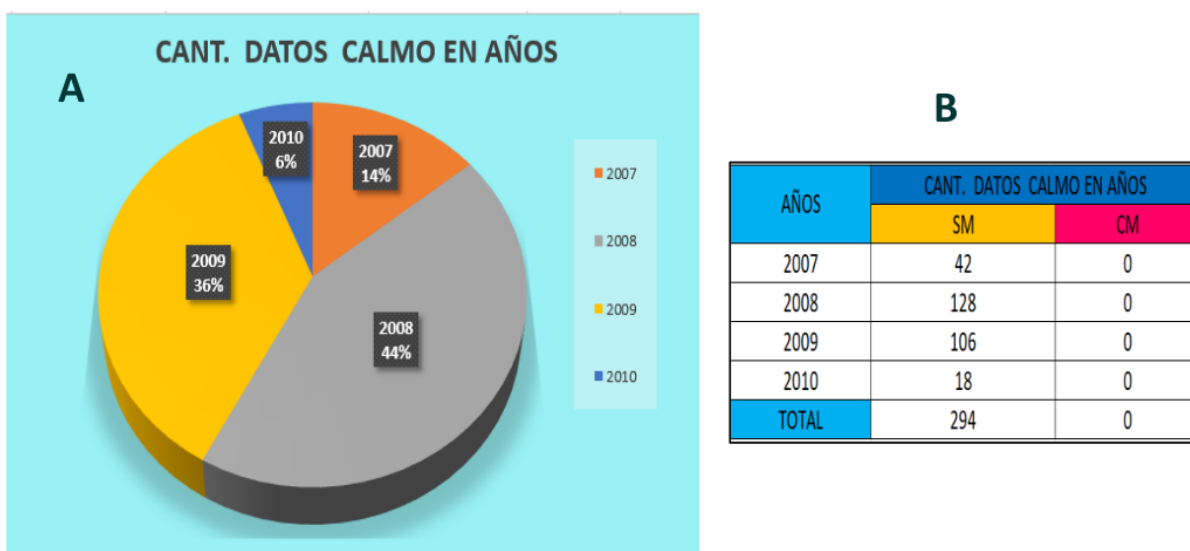


Figura 11 – A. Dias selecionados durante (2007-2010) anos sem manchas solares e B. Tabela de dados totais por ano, Sem manchas (SM) e Com manchas (CM).

É verificado na base de dados do solar monitor, dias que não tem manchas solares, então é escolhido a melhor região para ser estudada e através dos arquivos SST é estudada utilizando o linguagem de programação Python 3.

O telescópio faz medições diárias, e como exemplo o dia foi tomado 26 de Março do 2011 em um bom horário para estudo como é mostrado nas Figuras 12 e 13.

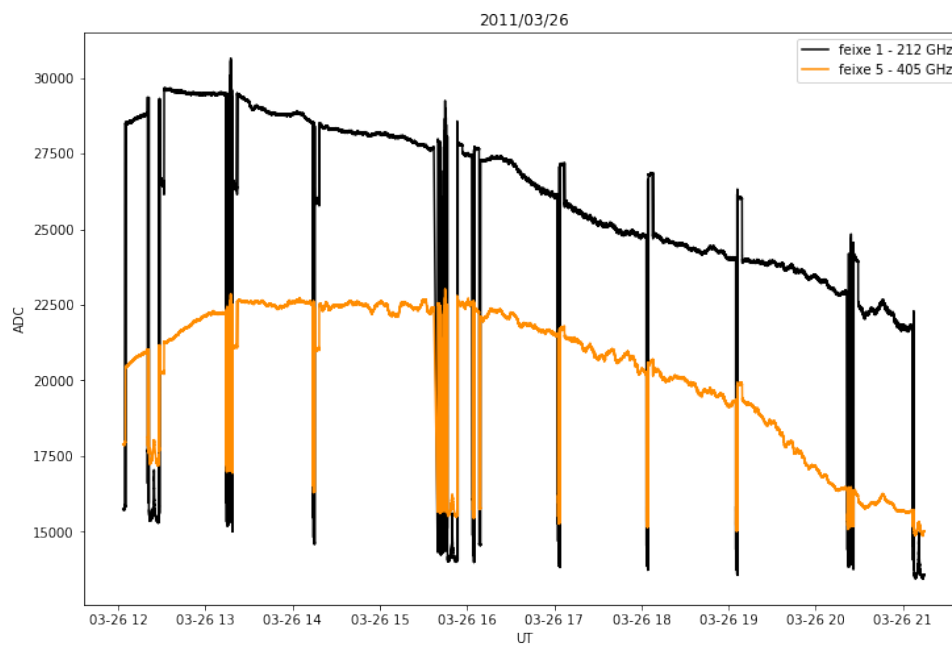


Figura 12 – Exemplo para as duas frequências 212 GHz e 405 GHz do SST.

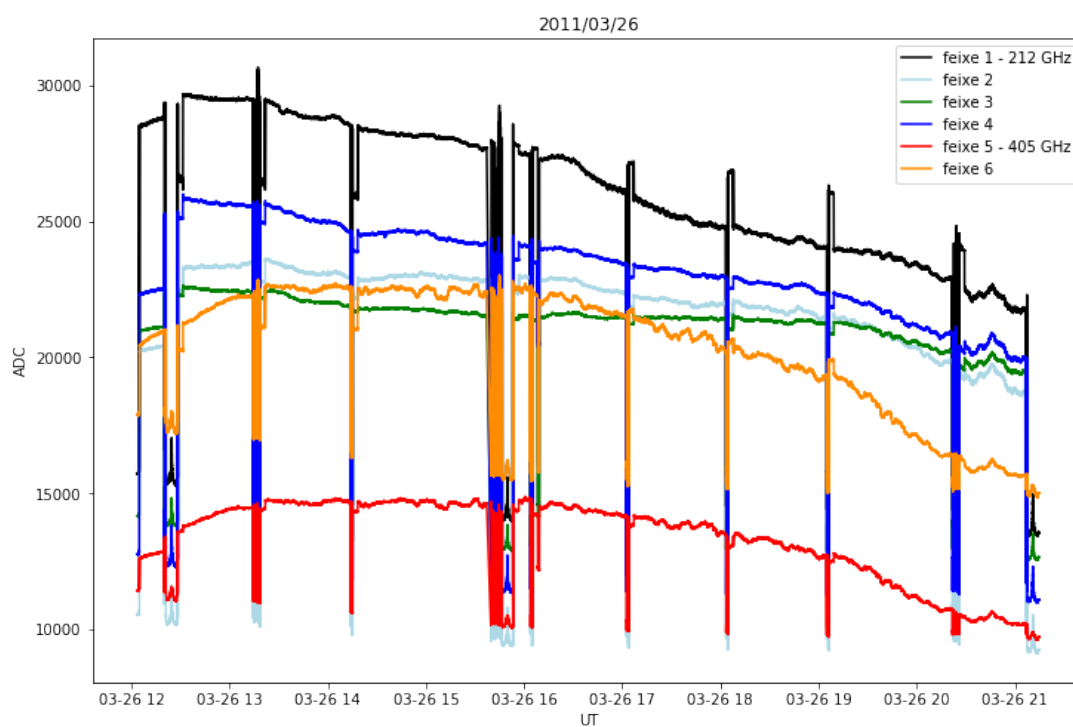


Figura 13 – Exemplo de uma hora de os 6 feixes para as quatro de frequências 212 GHz e dois de frequências 405 GHz.

Capítulo 4

Análise de dados

Quando o SST observa o Sol a temperatura de antena registrada segue a seguinte equação

$$T = T_c [1 - e^{-\tau\zeta}] + T_{\odot}e^{-\tau\zeta} + T_{\text{off}} , \quad (4.1)$$

onde $\zeta = 1/\sin H$ é a *massa de ar*, sendo ζ o ângulo de elevação da antena; T_c é a temperatura do céu, T_{\odot} a temperatura do Sol e T_{off} a temperatura de diferentes contribuintes não considerados nos outros termos (*spill over*, etc). A relação entre temperaturas é aproximadamente $T_{\text{off}} \sim T_c \ll T_{\odot}$.

Se trabalhamos com dados não calibrados esta mesma fórmula pode ser reescrita como

$$V = V_c [1 - e^{-\tau\zeta}] + V_{\odot}e^{-\tau\zeta} + V_{\text{off}} , \quad (4.2)$$

onde substituímos a grandeza temperatura T pela grandeza V de *valor não calibrado*. O termo final V_{off} representa outras contribuições sendo a mais importante a do próprio receptor. A diferença do caso de dados calibrados $V_{\text{off}} \sim V_{\odot}$ e portanto não pode ser desprezado.

A evolução temporal da opacidade em termos de um valor inicial mais uma variação relativamente pequena fica

$$\tau(t) = \tau(t_0) + \delta\tau(t) \equiv \tau_0 + \delta\tau . \quad (4.3)$$

Devemos considerar também a variação temporal de $\zeta(t)$, a massa de ar, e de $V_c(t)$, relacionada com a temperatura do céu. Tomando $V_{\odot} = \text{constante}$ e $V_{\text{off}} = \text{constante}$ temos

$$V'_0 = V_0 - V_{\text{off}} = V_{c_0} [1 - e^{-\tau_0\zeta_0}] + V_{\odot}e^{-\tau_0\zeta_0} \quad (4.4)$$

$$V'(t) = V(t) - V_{\text{off}} = (V_{c_0} + \delta V_c) [1 - e^{-(\tau_0 + \delta\tau)\zeta}] + V_{\odot}e^{-(\tau_0 + \delta\tau)\zeta} \quad (4.5)$$

onde $V_c = V_c(t_o)$. Antes de continuar vamos verificar o peso relativo dos dois termos. Para tanto usamos as expressões em temperatura:

$$T_1 = T_{\odot} e^{-\tau\zeta}, \quad T_2 = T_c [1 - e^{-\tau\zeta}] \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{T_1}{T_2} &= \frac{T_{\odot} e^{-\tau\zeta}}{T_c [1 - e^{-\tau\zeta}]} \\ &= \frac{T_{\odot}}{T_c} \frac{1 - e^{-\tau\zeta}}{e^{-\tau\zeta}} \\ &= \frac{T_{\odot}}{T_c} \left[\frac{1}{e^{-\tau\zeta}} - 1 \right] \\ \frac{T_1}{T_2} &= \frac{T_{\odot}}{T_c} e^{\tau\zeta} - \frac{T_{\odot}}{T_c} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Na equação (4.7) substituímos $T_{\odot} = 6000$ K e $T_c = 300$ K, $\tau = 0,25$ para a frequência de 212 GHz e $\zeta = 1/\sin(45^\circ) = 1,41$ para obter

$$212 \text{ GHz} : \quad \frac{T_1}{T_2} = \frac{6000}{300} e^{0,25 \cdot 1,41} - \frac{6000}{300} = 8,4 \quad (4.8)$$

No caso da frequência de 405 GHz $T_{\odot} = 5100$ K e $\tau = 1,1$

$$405 \text{ GHz} : \quad \frac{T_1}{T_2} = \frac{5100}{300} e^{1,1 \cdot 1,41} - \frac{5100}{300} = 63 . \quad (4.9)$$

Para chegar nestes valores usamos médias para a Profundidade óptica e elevação de observação. Fica claro, no entanto, que o *termo solar* T_1 é muito mais importante que o *termo atmosférico* T_2 .

4.1 Solução por aproximações

1. Desprezando a contribuição do céu: $V_c \equiv 0$

Na primeira aproximação vamos desprezar a contribuição do céu na variação de intensidades resgistrada pelo telescópio

$$\frac{V'}{V'_o} = \frac{V_{\odot} e^{-(\tau_o + \delta\tau)\zeta}}{V_{\odot} e^{-\tau_o\zeta_o}} = e^{-(\tau_o + \delta\tau)\zeta + \tau_o\zeta_o} = e^{\tau_o(\zeta_o - \zeta) - \delta\tau\zeta} . \quad (4.10)$$

Tomando o logaritmo natural em ambos os membros da equação

$$\ln \left(\frac{V'}{V'_o} \right) = \tau_o(\zeta_o - \zeta) - \delta\tau\zeta \Rightarrow \delta\tau = \frac{\tau_o(\zeta_o - \zeta) - \ln(V'/V'_o)}{\zeta} . \quad (4.11)$$

Um exemplo de cálculo pode ser visto na Figura 14, que foi realizada usando dados em 212 GHz em um dia cuja Profundidade óptica era em torno de $\tau_o = 1$. As quatro curvas representam as variações $\delta\tau$ obtidas para os canais 1 a 4 respectivamente.

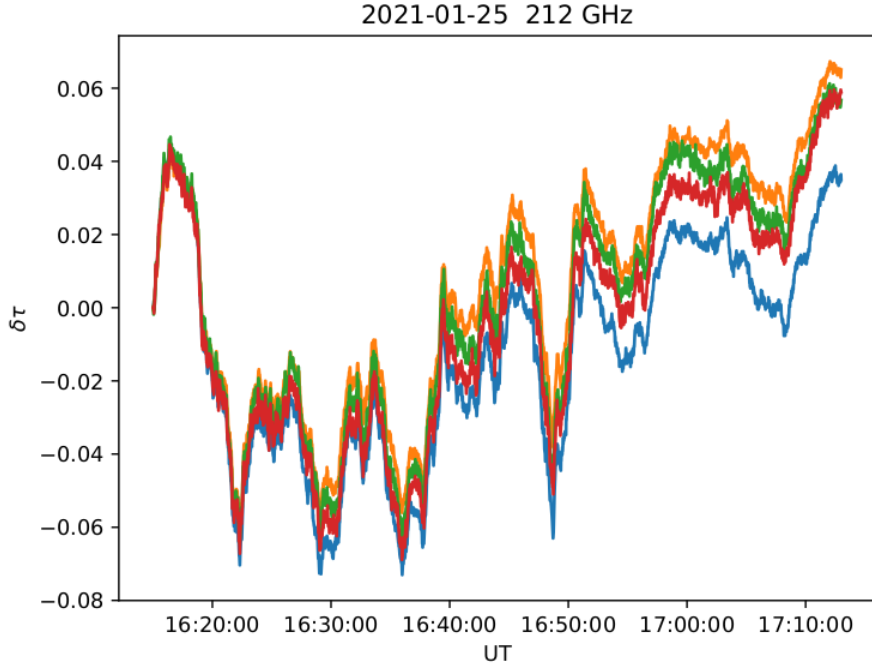


Figura 14 – Variações da opacidade ao zenith $\delta\tau$ para os quatro canais em 212 GHz, derivadas de observações de 25 de janeiro de 2021.

2. Contribuição constante do céu

Em segunda aproximação vamos considerar $V_c = \text{constante} \neq 0$. A equação (4.4) fica

$$V'_o = V_{c_o} - V_{c_o}e^{-\tau_o\zeta_o} + V_{\odot}e^{-\tau_o\zeta_o} \Rightarrow V''_o = (V_{\odot} - V_{c_o})e^{-\tau_o\zeta_o} . \quad (4.12)$$

Com $V''_o = V'_o - V_{c_o}$. E a equação (4.5)

$$V'(t) = V_{c_o} [1 - e^{-(\tau_o+\delta\tau)\zeta}] + V_{\odot}e^{-(\tau_o+\delta\tau)\zeta} \Rightarrow V''(t) = (V_{\odot} - V_{c_o})e^{-(\tau_o+\delta\tau)\zeta} . \quad (4.13)$$

Onde também definimos $V''(t) = V'(t) - V_{c_o}$. Chamando $\Delta V_{\odot} = V_{\odot} - V_{c_o}$ e dividindo a equação (4.13) pela (4.12)

$$\frac{V''(t)}{V''_o} = \frac{\Delta V_{\odot}e^{-(\tau_o+\delta\tau)\zeta}}{\Delta V_{\odot}e^{-\tau_o\zeta_o}} . \quad (4.14)$$

Tomando logaritmos e isolando $\delta\tau$

$$\delta\tau' = \frac{\tau_o(\zeta_o - \zeta) - \ln(V''/V''_o)}{\zeta} . \quad (4.15)$$

Para diferenciar do caso anterior, adicionamos um símbolo $'$ e chamamos $\delta\tau'$ esta solução. Verificamos que formalmente a equação (4.15) é igual à (4.11) exceto pelo fato de termos substituído $V' \rightarrow V''$ e $V'_o \rightarrow V''_o$. Aplicamos este método aos dados anteriores, e graficamos a diferença entre as soluções aproximadas da equação (4.11) e a da solução (4.15).

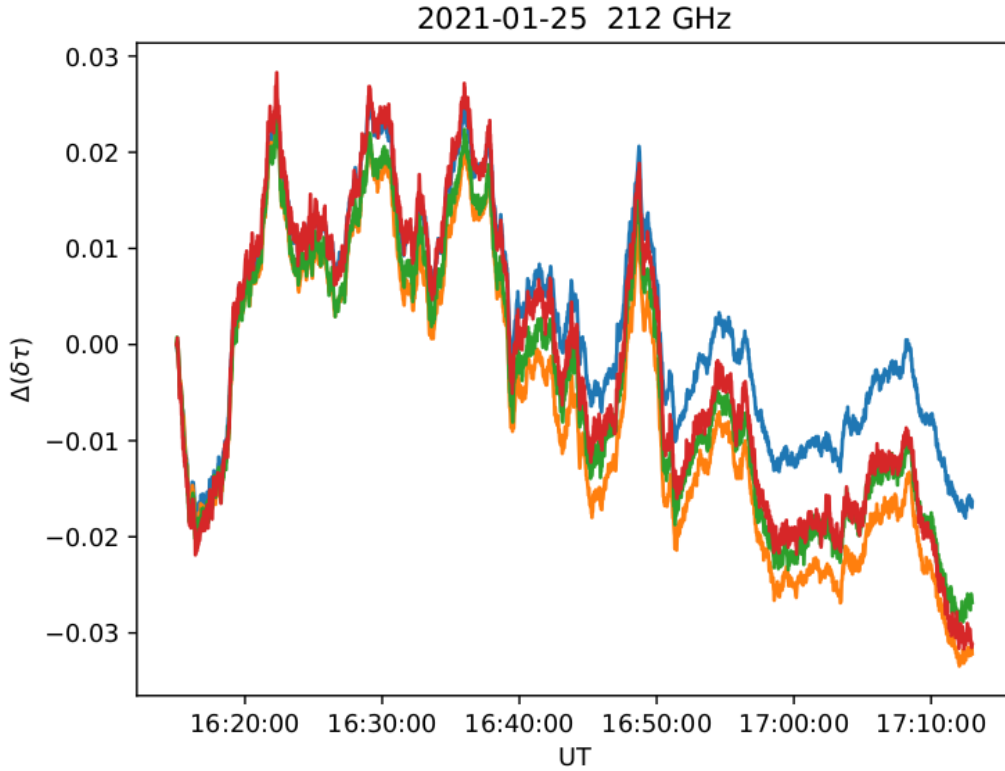


Figura 15 – Diferença entre as aproximações $\delta\tau$ e $\delta\tau'$.

3. Contribuição variável do céu

Neste caso vamos considerar

$$T_c(t) = [T_{c_0} + \delta T_c(t)] [1 - e^{-(\tau_0 + \delta\tau)\zeta(t)}] . \quad (4.16)$$

Para avaliar δT_c devemos lembrar qual é o significado de T_c em primeiro lugar. Esta é uma temperatura de brilhância *efetiva* do céu, porque a atmosfera não é um gás uniforme. A fórmula correta para T_c é

$$T_c = \int_0^\tau T(\tau') e^{-\tau'} d\tau' , \quad (4.17)$$

onde $T(\tau')$ é a temperatura atmosférica para uma profundidade óptica τ' na linha de observação, i.e. não precisa multiplicar pela massa de ar ζ , sendo $\tau' = 0$ no topo da atmosfera e $\tau' = \tau$ na superfície terrestre. Ou seja, que podemos considerar T_c como uma *média ponderada* pela profundidade óptica ao longo da linha de visada. Considerando uma camada atmosférica a temperatura constante T sua contribuição a T_c seria

$$\delta T = T(\tau) e^{-\delta\tau} \delta\tau \propto \delta\tau , \quad (4.18)$$

onde $\delta\tau$ é a profundidade óptica da camada, se a camada é suficientemente estreita, $\delta\tau \approx 0$ e $e^{-\delta\tau} \approx 1$.

Da mesma forma, podemos pensar que as variações temporais de T_c devem ser proporcionais às variações de $\delta\tau$ (neste caso o $\delta\tau$ é a variação da profundidade óptica **integrada** ao longo da atmosfera inteira). Assim, empiricamente propomos

$$\delta T_c(t) = \varepsilon \delta\tau(t) , \quad (4.19)$$

onde ε é o fator de proporcionalidade entre ambas as grandezas. Reescrevemos a equação (4.13) incluindo a fórmula anterior

$$V'(t) = (V_{c_0} + \varepsilon \delta\tau) \left[1 - e^{-(\tau_0 + \delta\tau)\zeta} \right] + V_{\odot} e^{-(\tau_0 + \delta\tau)\zeta} . \quad (4.20)$$

Distribuindo os parênteses

$$V''(t) = \Delta V_{\odot} e^{-(\tau_0 + \delta\tau)\zeta} + \varepsilon \delta\tau \left[1 - e^{-(\tau_0 + \delta\tau)\zeta} \right] \quad (4.21)$$

A equação (4.21) não tem solução analítica para $\delta\tau$. No entanto, é possível usar um método iterativo em que uma sequência $\delta\tau_i$ seja proposta até convergir no valor observado V'' . Lembrando que $\varepsilon \delta\tau$ é uma variação da temperatura do céu $\varepsilon \delta\tau \ll \Delta V_{\odot}$, podemos simplificar esta equação para torná-la linear em $\delta\tau$

$$V''(t) \approx \Delta V_{\odot} e^{-(\tau_0 + \delta\tau)\zeta} + \varepsilon \delta\tau \quad (4.22)$$

Chamamos a atenção ainda para o fato de não conhecermos o valor de ε . Podemos, no entanto, obter um valor aproximado por meio de programas que modelam a atmosfera terrestre como o **am** ou o **ATM**, simulando atmosferas com variações pequenas da temperatura, e demais fatores fixos, e encontrando tanto o valor da temperatura de brilhância do céu como o valor da profundidade óptica para derivar ε .

Capítulo 5

Resultados e discussão

Foi determinado as profundidade óptica atmosféricas em 212 (τ_{212}) GHz e 405 (τ_{405}) GHz usando o método da brilhância do Sol. Os resultados obtidos durante os 4 anos de 2017 a 2010 para as duas frequências 212 GHz e 405 GHz usando as seis feixes do SST são obtidas as profundidades ópticas atmosféricas, o ajusta os dados emparelhados x_i, y_i ao modelo linear, $y = a + bx$. Onde o valor da equação linear $a = 0.008$ e $b = 6.77$; o coeficiente de correlação linear é 0.952478. Na figura 16 Profundidade óptica atmosférica em 212 e 405 GHz determinada mediante o método da brilhância do Sol. As medidas das profundidades ópticas atmosféricas determinadas em 212 GHz, registrado entre os quatro feixes (2, 3, 4 e 5) do SST. Como podemos ver na figura 16, há poucos dados durante os quatro anos devido à seleção de dados em dias de sol calmo onde foi utilizado o método do brilho do Sol, onde varia com as estações do ano

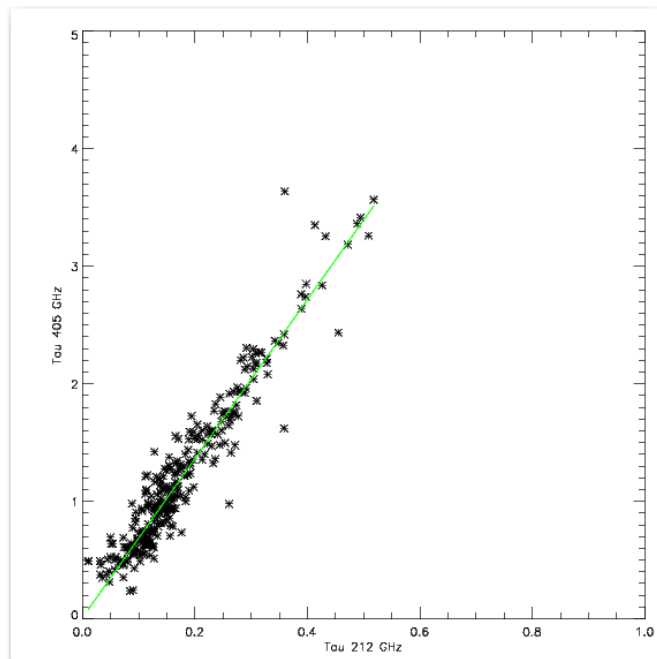


Figura 16 – Correlação das profundidades ópticas atmosféricas para as duas frequências 212 GHz e 405 GHz obtidas com o método da brilhância do Sol.

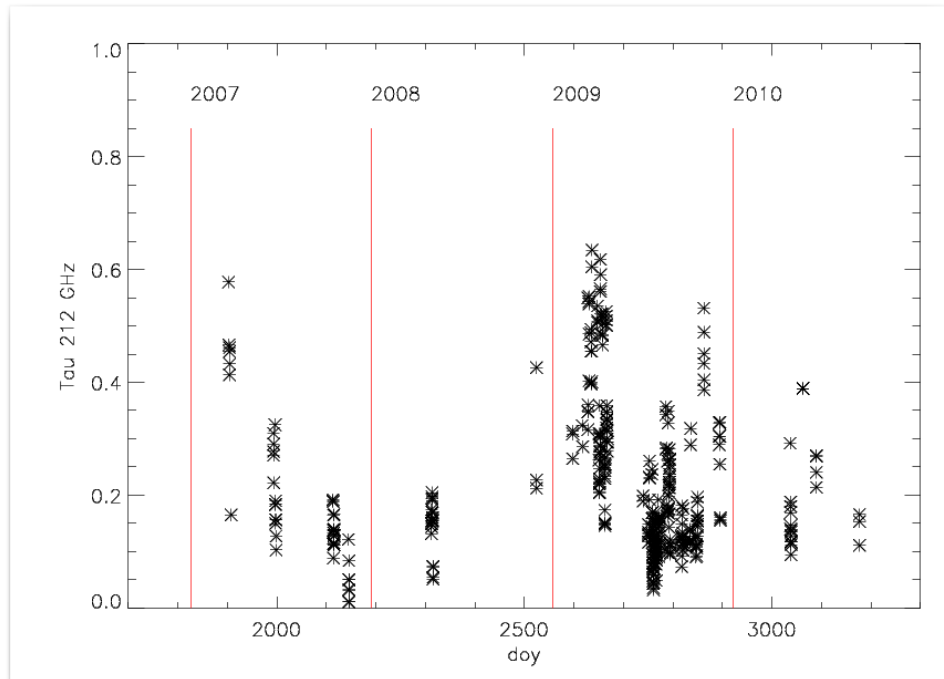


Figura 17 – A opacidade atmosférica em 212 GHz derivada pelo método da brilhância do Sol no período de 2007 até 2010.

5.1 Variação de τ observada no dia 17 de junho de 2007.

Pode ser programado, onde deseja fazer e não há regiões ativas e estão apontando para o centro do sol, onde é observado das 13:50 às 13:55 para 3 canais em 212 GHz em cores diferentes existem variações de 0,00 até $-0,04$. Na figura 18 foi obtido usando o equação (4.15) considerando um valor de temperatura constante do céu, as variações de $(\delta\tau')$ são deduzidas em seguida, uma próxima varredura de tau foi escolhida. Só funciona com os canais da frequência 212 GHz. Os canais começam do zero conforme o tempo passa as reduções de τ o menor valor que é -0.04 . A parte é inferior um dos 3 canais representados em ADCs com um valor de 18.000.

Na figura 19 se tem a variação de 0.003 até -0.003 para os 3 canais em 212 GHz as 3 canais juntas, Se pode ver uma tendência muito clara em que diminui por 15 minutos, Você deseja ver se há variações mais rápidas. A tendência global de variação ou $\delta\tau$ também é chamada de total, também existem flutuações e o que ela faz ajusta as retas nas curvas e subtrai as retas (Detrended = eliminar tendência). Aí foi eliminada a tendência global ou total, que é uma linha reta e agora você vê as oscilações em torno de zero e tem um pico que vai até 0,002 e que tem uma variação de até um minuto, então essas são as variações que nos interessam.

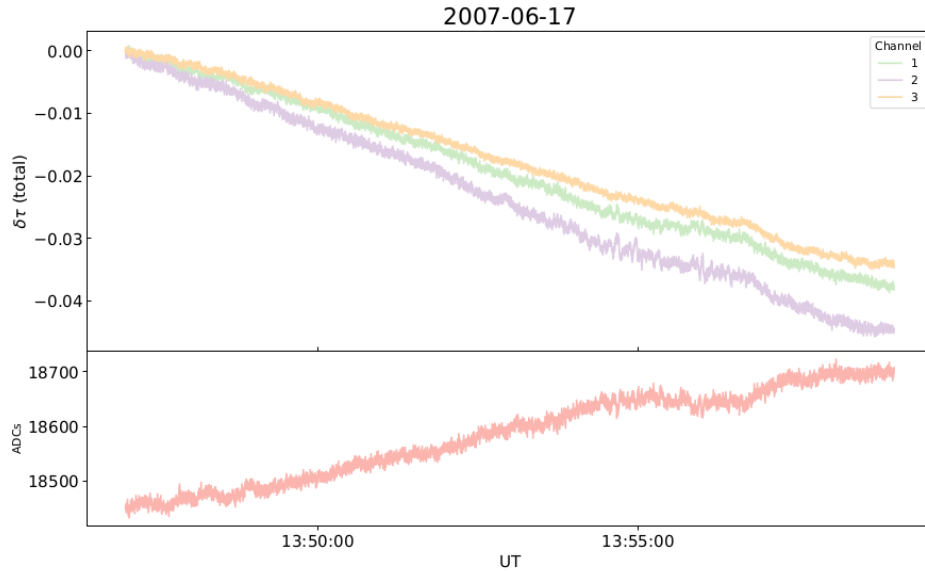


Figura 18 – Representa a variação total. Profundidades ópticas $\tau_{212} = 0,32$.

Esta tendência onde é observada e pode ser interpretada suavemente está mudando e $\tau_{212} = 0,32$ va suavemente cada 15 min também pode haver variações mais rápidas é quando o detrended é feito e é visto que houve uma variação de 0,002 que durou um minuto.

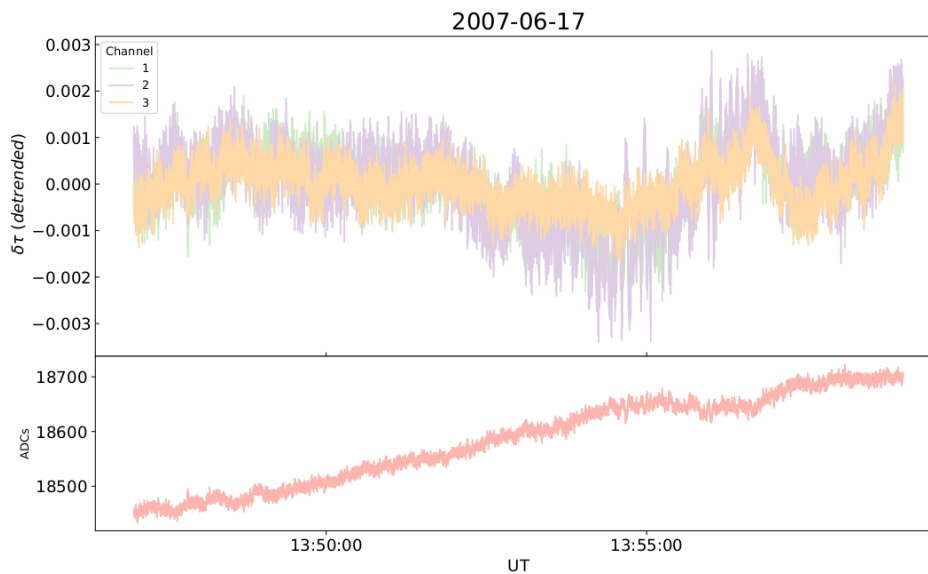


Figura 19 – Representa a variação após eliminar uma tendência linear. profundidades ópticas $\tau_{212} = 0,32$.

Na tabela 2 queremos saber se essas flutuações de opacidade estão relacionadas ou se é observada nos 3 feixes simultaneamente se eles são locais em cada feixe, mede uma região diferente para o céu, então a correlação é ligeiramente alta, quando a detrended 0,75 e 0,52 mas muito maior no total 0,99 significa que é possível que as variações rápidas sejam mais localizadas e além do SST sejam separadas pela distância de minutos de arco, então o detrended é menor que o total, está mostrando a variação do τ de todo o céu

e quando o detrended é feito, ele está olhando para regiões menores do céu que são os feixes.

	<i>Detrended</i>		Total	
	2	3	2	3
1	0,75	0,62	0,99	0,99
2		0,58		0,99

Tabela 2 – Correlações $\delta\tau_i \times \delta\tau_j$.

Na tabela 3 Busca-se a correlação entre a variação do conteúdo de vapor d'água e a variação de $\delta\tau$ para cada canal. O vapor de água foram calculados com o banco de dados da estação meteorológica. O conteúdo do vapor de água é uma aproximação onde compara os valores observados.

Tipo	Canal		
	1	2	3
Total	0,061	0,062	0,056
<i>Detrended</i>	0,356	0,367	0,395

Tabela 3 – Correlações $\delta\tau_i \times \text{PWV}$.

5.2 Variação de τ observada em 17 de junho de 2007 ao meio dia.

Na figura 20 é o mesmo dia mas um pouco mais tarde, 2 horas depois da imagem é o total das duas frequências do canal 1 da cor azul, a cor laranja é do canal 4, dá para ver como estão as variações.

O canal 4 não tem tendência a partir de zero e tem variações muito fortes 0,1 e as outras cores têm uma tendência e estão diminuindo e a opacidade inicial em relação à medição da manhã e a opacidade está diminuindo e o $\delta\tau$ está diminuindo 2 horas depois a opacidade em 212 GHz baixo 0,31 e a opacidade em 405 GHz é 1,54 uma opacidade relativamente alta.

Na Fig. 21 as variações são feitas linearmente, não variam muito, para os 4 canais e nas 2 frequências de 212 GHz e 405 GHz, O valor do céu inicial que nos dá em ADCs de 10000 a 20000, se fosse calibrado nos daria uma temperatura em graus Kelvin, onde sua temperatura deve ser proporcional à variação da profundidade óptica, a correlação entre os canais do detrended é menor que o total existe uma correlação muito mais próxima do canal é um pouco menor (1,4), (2,4) e (3,4) aqui existe uma correlação entre as variações rápidas em 212 e 405 GHz e isso se observa quando se olha para o total onde as correlações são muito altas é assim quase 1, agora em (1, 4) e (2,4) ao comparar 0,16 que não é considerada uma boa correlação globalmente. Uma correlação entre 212 e 405 GHz não é

boa, mas no nível local como variações rápidas. O detrended em 405 GHz não vê nada e os canais 1, 2 e 3 variam.

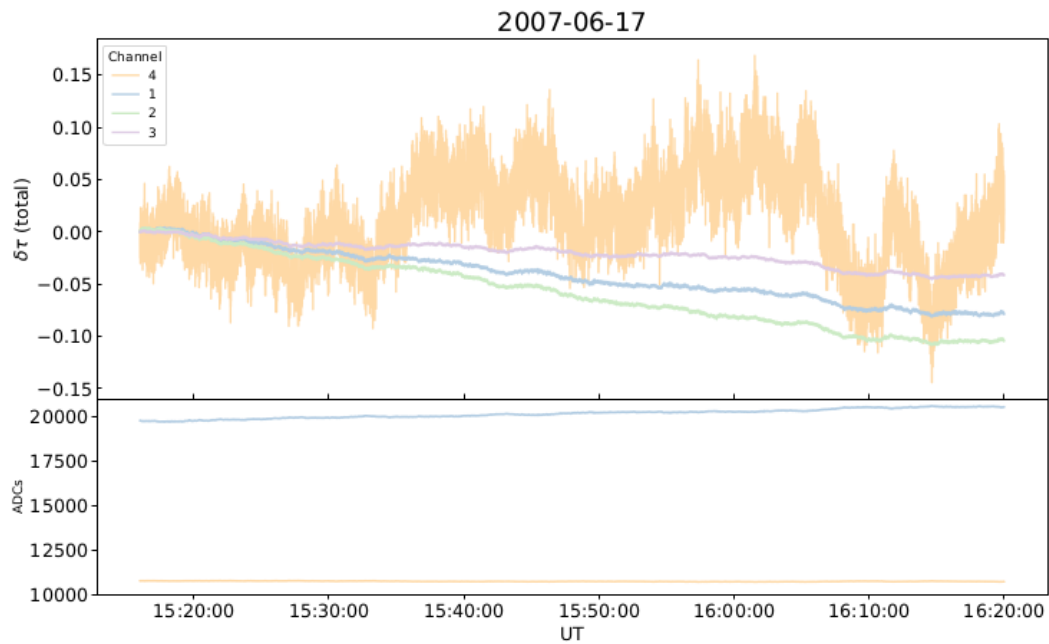


Figura 20 – Representa a variação total. Opacidade $\tau_{212} = 0,31$ e $\tau_{405} = 1,54$.

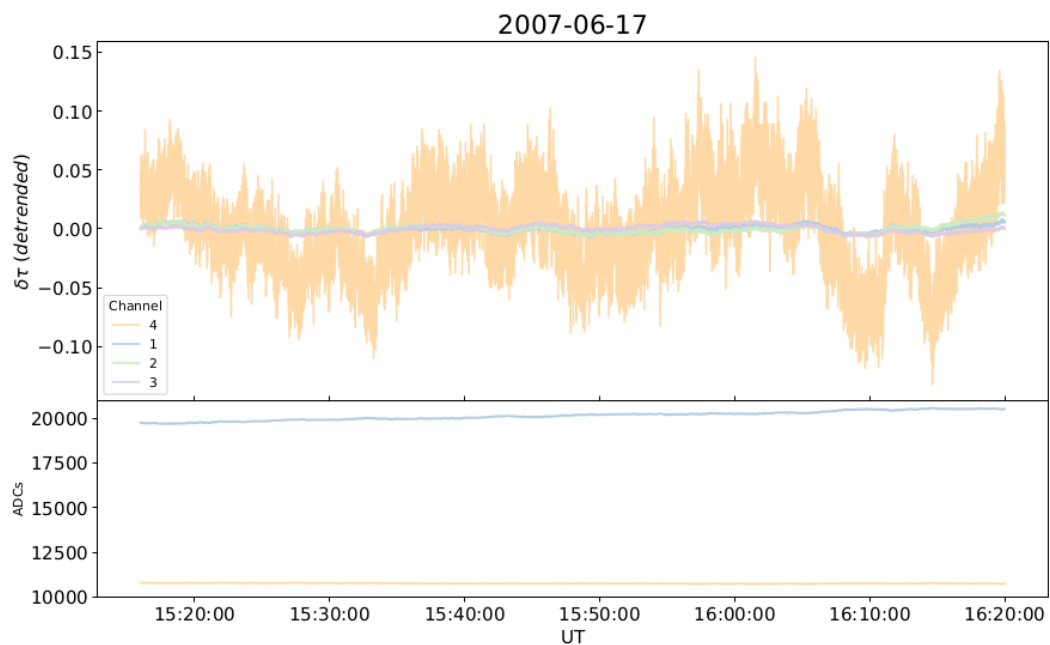


Figura 21 – Representa a variação após eliminar uma tendência linear. Profundidade óptica $\tau_{212} = 0,31$ e $\tau_{405} = 1,54$.

Na tabela 4 este método é utilizado para um estudo de no máximo 10 minutos, quanto mais tempo os 4 canais em 212 GHz e 405 GHz são separados, com uma variação 0.15 até -0.15 e uma opacidade $\tau_{212} = 0,31$ e $\tau_{405} = 1,54$.

	<i>Detrended</i>			Total		
	2	3	4	2	3	4
1	0,779	0,456	0,682	0,997	0,974	-0,006
2		0,133	0,472		0,966	-0,037
3			0,703			0,164

Tabela 4 – Correlações $\delta\tau_i \times \delta\tau_j$.

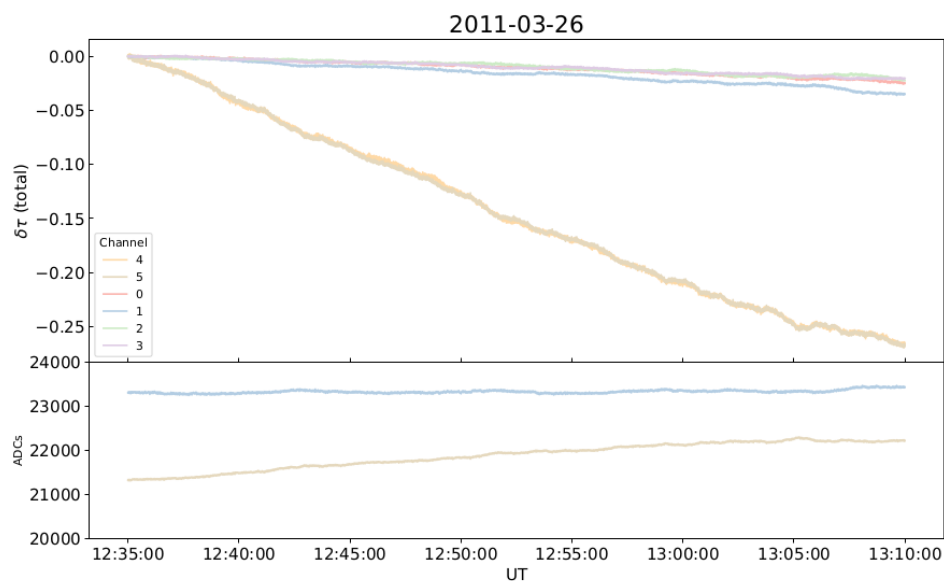
Na tabela 5 o total e o detrended não podem ser comparados porque são muito baixos.

Tipo	Canal			
	1	2	3	4
Total	0,148	0,154	0,193	0,093
<i>Detrended</i>	-0,187	-0,148	0,115	-0,059

Tabela 5 – Correlações $\delta\tau_i \times \text{PWV}$.

5.3 Variação de τ observada em 26 de março de 2011 de manhã.

Aquí estan todos los canales 4 de 212 GHz y 2 de 405 GHz. Na Fig. 22 representa uma variação total de 0.00 até -0,25 onde há muita variação para ambos canais, pois a frequência de 212 GHz é constante e a frequência de 405 GHz suas variações têm muita diferença, O valor do céu inicial que nos dá em ADCs de 20000 a 24000, se fosse calibrado nos daria uma temperatura em graus Kelvin.

Figura 22 – Representa a variação total. Profundidade óptica $\tau_{212} = 0,11$ e $\tau_{405} = 0,53$.

Na Figura.23 para as 2 frequência de 212 e 405 GHz sou constantes, com uma variação de 0,010 até 0,005 são muito significativos.

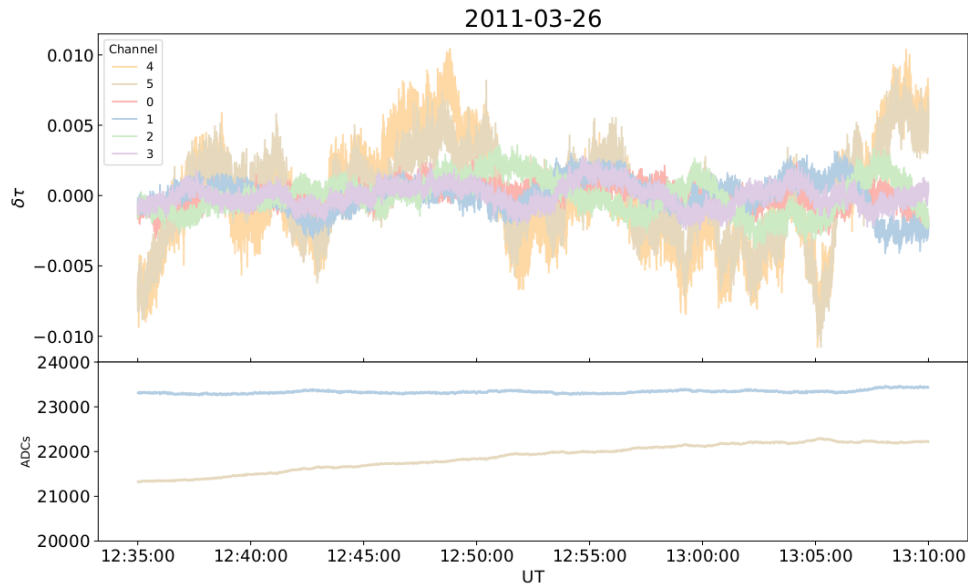


Figura 23 – Representa a variação após eliminar uma tendência linear. Profundidade óptica $\tau_{212} = 0,11$ e $\tau_{405} = 0,53$.

Na tabela 6 são iguais, o total em geral tem correlações muito boas e aqui nos canais em 212 e 405 GHz estão muito bem correlacionadas em detrended fica mais difícil, detrended como é local as correlações são menores.

Na tabela 7 a tendência global é melhor 212 e 405 GHz é a mesma tendência, algumas são negativas, isso indica que as variações locais são bolhas de ar e a correlação do vapor de água aqui não é forte nas medidas totais ao contrário do detrended.

	<i>Detrended</i>					Total				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0	0,283	0,324	0,309	0,280	0,337	0,990	0,980	0,990	0,997	0,988
1		-0,327	0,506	-0,122	-0,089		0,964	0,992	0,986	0,987
2			0,309	0,373	0,410			0,963	0,975	0,975
3				0,391	0,349				0,988	0,988
4					0,882					0,999

Tabela 6 – Correlações $\delta\tau_i \times \delta\tau_j$.

Tipo	Canal					
	0	1	2	3	4	5
Total	0,738	0,742	0,740	0,757	0,787	0,787
<i>Detrended</i>	-0,176	-0,126	-0,032	0,008	0,122	0,133

Tabela 7 – Correlações $\delta\tau_i \times$ PWV

5.4 Variação de τ observada em 20 de março de 2007 ao meio dia.

Existem todos os canais, aqui na curva fina estão os 4 canais a variação em 405 GHz é muito maior aqui a opacidade em 405 GHz era muito alta de 2,42 e a variação em $\delta\tau=0,3$ e depois de 5 min está em 0,4, então parece que a conclusão da opacidade é alta e tem altas flutuações delta, quando a opacidade é baixa é melhor.

Na Fig. 24 Representa uma variação de 0.6 até -0,2 onde não há muita variação para ambos canais, pois a frequência de 212 GHz é constante e a frequência de 405 GHz, suas variações é mais alto, O valor do céu inicial que nos dá em ADCs de 16000 a 22000, se fosse calibrado nos daria uma temperatura em graus Kelvin.

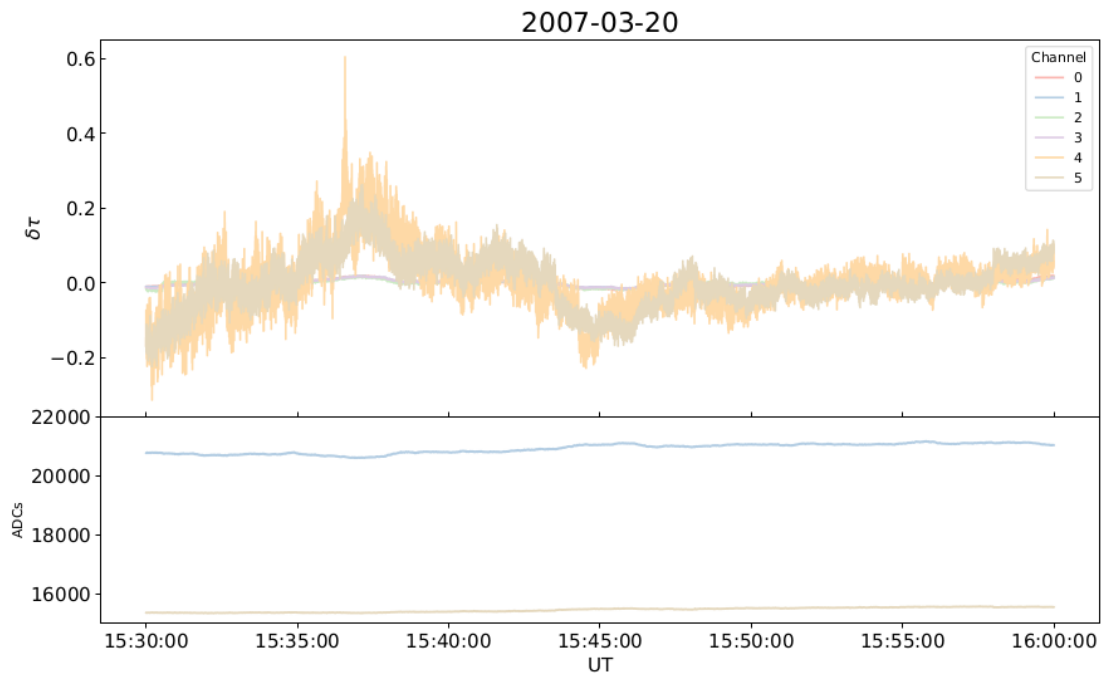


Figura 24 – Representa a variação total após eliminar uma tendência linear. Profundidade óptica atmosférica. $\tau_{212} = 0,48$ e $\tau_{405} = 2,42$

Para a Fig.25 Para as 2 frequência de 212 GHz e 405 GHz sou muito diferentes, com uma variação de -1.0 até 0,4.

	<i>Detrended</i>					Total				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0	0,953	0,867	0,943	0,726	0,808	0,994	-0,807	0,996	0,992	0,995
1		0,903	0,985	0,796	0,884		-0,758	0,997	0,982	0,989
2			0,894	0,671	0,778			-0,794	-0,824	-0,815
3				0,816	0,892				0,988	0,993
4					0,779					0,989

Tabela 8 – Correlações $\delta\tau_i \times \delta\tau_j$.

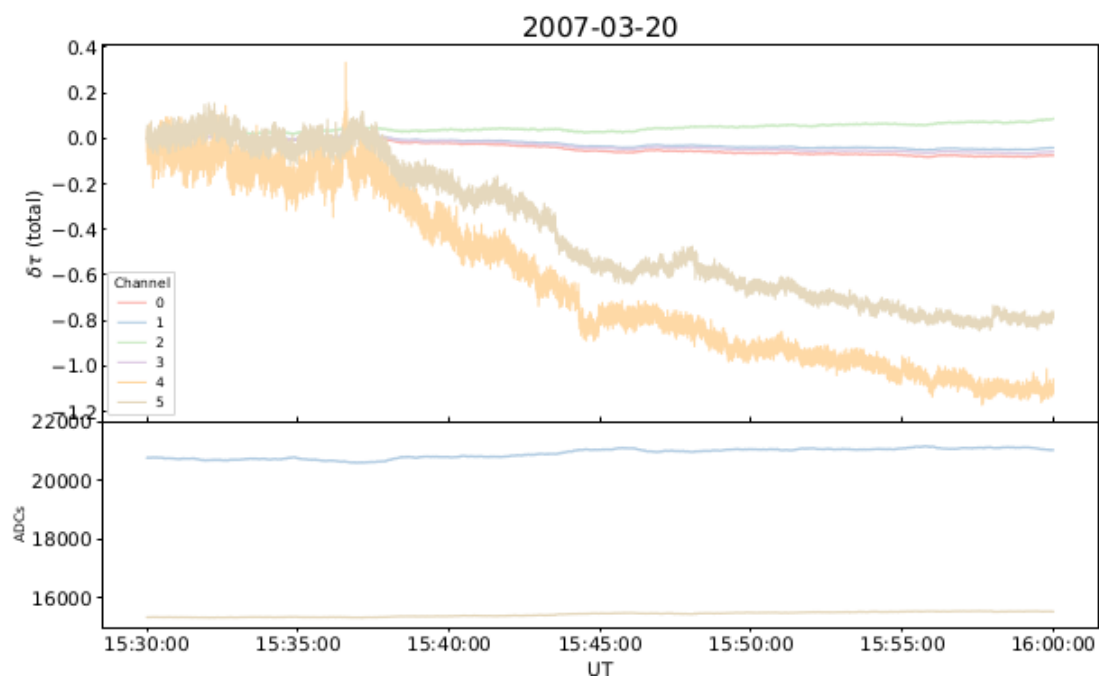


Figura 25 – Representa a variação detrended. Profundidade óptica atmosférica $\tau_{212} = 0,48$ e $\tau_{405} = 2,42$

Tipo	Canal					
	0	1	2	3	4	5
Total	0,710	0,701	-0,642	0,709	0,713	0,709
Detrended	0,104	0,101	0,017	0,107	0,144	0,112

Tabela 9 – Correlações $\delta\tau_i \times \text{PWV}$.

Capítulo 6

Conclusões

1. Desenvolvemos um método que permite estimar a variação da profundidade ótica associando-a às variações da temperatura de antena registrada por cada canal. O método supõe que a temperatura do céu é constante e que a variação da temperatura de antena é devida as oscilações da profundidade ótica. .
2. Aplicamos o método a quatro casos diferentes: um com profundidade ótica muito pequena, dois com valores intermediários e um quarto com valor bastante alto.
3. Verificamos em todos os casos uma variação rápida sobre uma lenta. Por meio de um ajuste linhar, eliminamos a variação lenta (detrending).
4. A variação lenta pode estar associada tanto a variação da profundidade ótica quanto ao ganho dos receptores toda vez que este parâmetro depende da temperatura ambiente.
5. Analisando as variações rápidas da profundidade ótica, podemos ver que:
 - Ela vai de 0,5% até 20%
 - Quanto menor é a profundidade ótica inicial menor é a variação rápida percentual.
 - A correlação entre canais é mais alta quando se considera a variação total (não detrended).
 - A variação total tem correlação mais alta com o conteúdo e vapor de água (PWV).

Referências

- CASSIANO, M. M. et al. Precipitable water vapor and 212 ghz atmospheric optical depth correlation at el leoncito site. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 168, p. 32 – 36, 2018. ISSN 1364-6826. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136468261730576X>>. Citado na página 22.
- CORNEJO-ESPINOZA, D. *Determinação da opacidade atmosférica em comprimentos de ondas submilimétricas*. Dissertação (M.S. Dissertation) — Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, Brazil, 2017. <<http://tede.mackenzie.br/jspui/handle/tede/3581>>. Citado 5 vezes nas páginas 9, 13, 20, 21 e 22.
- DICKE, R. H. et al. Atmospheric absorption measurements with a microwave radiometer. *Phys. Rev.*, American Physical Society, v. 70, p. 340–348, Sep 1946. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.70.340>>. Citado na página 19.
- GIMÉNEZ-DE-CASTRO, C. G. *Apostilas de Rádio Ciências*. [S.l.], 2019. Citado 4 vezes nas páginas 9, 16, 17 e 20.
- J.W. WATERS. 2.3. absorption and emission by atmospheric gases. In: MEEKS, M. (Ed.). *Astrophysics Radio Telescopes*. Academic Press, 1976, (Methods in Experimental Physics, v. 12, Part B). p. 142 – 176. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0076695X08606845>>. Citado na página 13.
- KAUFMANN, P. et al. The new submillimeter-wave solar telescope. In: . [S.l.: s.n.], 2001. v. 1, p. 439 – 442 vol.1. ISBN 0-7803-7065-1. Citado na página 24.
- KAUFMANN, P. et al. New telescopes for ground-based solar observations at submillimeter and mid-infrared. In: *Ground-based and Airborne Telescopes II*. [S.l.: s.n.], 2008. (Proceedings of the SPIE, v. 7012), p. 70120L. Citado 5 vezes nas páginas 9, 24, 25, 26 e 27.
- KRAUSS, JOHN. D. *Radio Astronomy*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1966. Citado na página 18.
- MELO, A. et al. Submillimeter-wave atmospheric transmission at el leoncito, argentina andes. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, v. 53, p. 1528 – 1534, 05 2005. Citado 5 vezes nas páginas 13, 18, 19, 21 e 22.
- ULICH, B. L. Improved correction for millimeter-wavelength atmospheric attenuation. *Astrophys. Lett.; (United States)*, v. 21, p. 21–28, 1980. Citado na página 13.

VALLE-SILVA, J. et al. Optical depth measurements at 45 and 90 ghz in casleo. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 199, p. 105214, 2020. ISSN 1364-6826. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682620300328>>. Citado na página 22.