

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

PEDRO HENRIQUE MOMBELLI

**ESPECTROSCOPIA DA ATMOSFERA DE MARTE: EM BUSCA DO METANO NA
REGIÃO DA CRATERA DE GALE**

Caçapava do Sul

2016

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

M732e Mombelli, Pedro Henrique
ESPECTROSCOPIA DA ATMOSFERA DE MARTE: EM BUSCA DO METANO NA
REGIÃO DA CRATERA DE GALE / Pedro Henrique Mombelli.
66 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, GEOFÍSICA, 2016.

"Orientação: Vinicius de Abreu Oliveira".

1. Espectroscopia. 2. Atmosfera de Marte. 3. Metano. 4.
Cratera de Gale. 5. Astrofísica. I. Título.

PEDRO HENRIQUE MOMBELLI

**ESPECTROSCOPIA DA ATMOSFERA DE MARTE: EM BUSCA DO METANO NA
REGIÃO DA CRATERA DE GALE**

Trabalho de conclusão de curso de
Graduação em Geofísica pela Universidade
Federal do Pampa como requisito para
obtenção do Título de Bacharel.

Área de concentração: Geofísica Espacial.

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em: __ / __ / __

Banca examinadora:

Prof. Dr. Vinícius de Abreu Oliveira
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Everton Frigo
UNIPAMPA

Prof. Dr. Igor Antônio Cancela Melnik
UNIPAMPA

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu professor orientador – mas principalmente, meu amigo Dr. Vinicius de Abreu Oliveira, pelas incontáveis horas de esforço intelectual para que este projeto de fazer algo “diferente” saísse de apenas uma vontade.

A *European Space Agency*, que disponibilizou os dados utilizados neste projeto, bem como algumas rotinas de processamento pré-estipuladas.

Ao Dr. Giuseppe Sindoni, ex-encarregado de administrar os dados do equipamento utilizado, por me elucidar em diversas questões ao decorrer deste projeto, bem como por ceder gentilmente algumas das rotinas mais importantes para que este trabalho seguisse em frente.

Ao Dr. Marco Giuranna, investigador principal do equipamento utilizado, por também elucidar-me em diversas questões-chave no decorrer do projeto, bem como manter-se à disposição para realizar análises mais profundas com os dados utilizados.

Agradeço a minha namorada e companheira, Giovanna Paixão, por ter me proporcionado casa, comida, carinho e incentivo, colaborado (na maioria das vezes) para que eu pudesse me dedicar a este projeto sem maiores preocupações exteriores.

Agradeço a minha família por me dar a educação e sustento necessário para que tudo isto tenha sido possível; Sem vocês eu não seria ninguém.

Aos meus amigos, por compreenderem que estou ausente das reuniões de final de semana e partidas de *League of Legends*, devido ao foco necessário para realização deste projeto (e não por causa da namorada).

Por último, a comissão de curso da geofísica da UNIPAMPA, por ter ampliado os horizontes de alcance das geociências no campus, possibilitando diversos trabalhos de conclusão de curso fora do “granito Caçapava”, e até mesmo fora da Terra.

LISTA DE SIGLAS

ASI – Agenzia Spaziale Italiana (Agência Espacial Italiana)

ESA – European Space Agency (Agência Espacial Européia)

EXT – Extended Mission (Missão Extendida)

FFT – Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)

FOV – Field Of View (Campo de Visão)

IDL – Interactive Data Language (Linguagem de Dados Interativa)

IR – Infravermelho

JPL – Jet Propulsion Laboratory (Laboratório de Propulsão a Jato)

Ls – Longitude Solar

LW – Long Wave

MC – Mars Chart (Catálogo de Marte)

MEP – Mars Exploration Program (Programa de Exploração de Marte)

NASA – (National Aeronautics and Space Administration (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço))

NER – Noise Equivalent Radiation (Radiação de Ruído Equivalente)

PDS – Planetary Data System (Sistema de dados Planetários)

PFS – Planetary Fourier Spectrometer (Espectrômetro Planetário de Fourier)

PSA – Planetary Science Archives (Arquivos de Ciência Planetária)

SNR – Signal to Noise Ratio (Razão Sinal Ruído)

SW – Short Wave

USGS – United States Geological Survey (Serviço Geológico dos Estados Unidos)

RESUMO

Desde o ano de 1964, quando a sonda espacial Mariner 4 (Estados Unidos) enviou as primeiras imagens detalhadas da superfície de Marte, o Planeta Vermelho tem atraído a atenção e curiosidade da comunidade científica de vários países. Atualmente, Marte é considerado o planeta do Sistema Solar com o maior número de objetos de pesquisa produzidos por humanos, fora a própria Terra. Isso acaba se refletindo na quantidade de dados disponíveis para análise, apresentando um banco de dados literalmente astronômico. Este trabalho de pesquisa, realizado na área de Geofísica Espacial e Astronomia Planetária, utiliza-se dos dados captados pelo Espectrômetro Planetário de Fourier (Planetary Fourier Spectrometer – PFS), um interferômetro duplo de Michelson a bordo da missão Mars Express, lançada pela Agência Espacial Europeia (European Space Agency – ESA), em 2003. O principal objetivo está em determinar qualitativamente a possível existência de metano (CH_4) em 9 regiões específicas da atmosfera do Planeta Vermelho, utilizando-se do método físico denominado Espectroscopia. Para a leitura computacional dos dados, foram utilizados scripts cedidos e desenvolvidos em IDL, estimando assim, suas chances de ser detectado em determinados períodos de tempo, nas regiões delimitadas. A região alvo escolhida é denominada Cratera de Gale, local onde atualmente se encontra o Rover Curiosity (Estados Unidos), e onde é possível observar a maior coluna estratigráfica sedimentar a céu aberto de Marte. As análises mostraram que o metano fica possivelmente mais perceptível nos períodos de equinócio (primavera e outono). Os valores observados das possíveis absorções do metano nos espectros gerados estão em torno de 2 à 4 vezes maior do que o valor do ruído interno do equipamento. Duas regiões específicas do planeta se evidenciam como prováveis regiões-fonte do elemento, exigindo um estudo mais aprofundado, focado nestes locais.

Palavras-chave: Espectroscopia. Marte. Atmosfera. Metano. Cratera Gale. Mars Express. Planetary Fourier Spectrometer. IDL. Geofísica Espacial. Astrofísica Planetária.

ABSTRACT

Since 1964, when the space prober called Mariner 4 (USA) send the first detailed images of the surface of Mars, the Red Planet has attracted the attention and curiosity of the scientific community around the world. Presently, Mars is considered the planet of the solar system with the greatest number of research objects produced by humans, excluding our Earth. This ended up reflecting in the amount of available data for analysis, presenting a literally huge data-base. This research project, developed in the Space Geophysics and Planetary Astrophysics field, makes use of the data captured by the Planetary Fourier Spectrometer – PFS, a Michelson double-pendulum interferometer onboard the Mars Express mission, launched by the European Space Agency – ESA, in 2003. The primary objective is to qualitatively estimate the possible existence of methane (CH₄) in 9 specific regions of the atmosphere of the Red Planet, making use of the physical method called spectroscopy. For the computational reading of the data, it has been used multiple assigned and developed scripts in IDL, thereby estimating, the chances of methane being detected in selected periods of time, in the delimited regions. The target region chosen is called Gale Crater, a local where presently the rover Curiosity (EUA) is located, and is also possible to observe the biggest open-air stratigraphic column of Mars. The analysis showed that the methane is possibly more perceptible in the equinox periods (spring and autumn). The possible observation of the methane values in the spectra generated are around 2 to 4 times greater than the internal noise value of the equipment. Two specific regions of the planet stand out as a possible “source region” of the compound, requiring a more detailed study focused on these locations.

Keywords: Spectroscopy. Mars. Atmosphere. Methane. Gale Crater. Mars Express. Planetary Fourier Spectrometer. IDL. Space Geophysics. Planetary Astrophysics.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 OBJETIVOS.....	8
3 JUSTIFICATIVA.....	9
4 O PLANETA MARTE	10
4.1 ORBITA	11
4.2 ATMOSFERA	13
4.3 SUBDIVISÃO DA SUPERFÍCIE	14
4.4 REGIÃO DE INTERESSE.....	15
5 REVISÃO GERAL DOS FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	19
5.1 ESPECTRO	20
5.2 RADIANCIA E ABSORBÂNCIA.....	22
5.3 METANO	23
5.3.1 METANO EM MARTE	25
6 TRABALHOS ANTERIORES NA ÁREA DE ESTUDO	25
7 MATERIAIS UTILIZADOS	27
7.1 PFS.....	27
7.1.1 LINHAS DE ABSORÇÃO DO METANO	30
7.2 DADOS.....	32
8 SEPARAÇÃO DAS REGIÕES DE ESTUDO.....	33
8.1 PROCESSAMENTO.....	35
9 ANÁLISE DOS DADOS.....	43
9.1 PRIMAVERA	43
9.2 VERÃO	49
9.3 OUTONO	51
9.4 INVERNO.....	54
10 DISCUSSÃO	57
11 TRABALHOS FUTUROS.....	60
11 CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

Desde o preciso momento em que nossos ancestrais levantaram-se do chão e começaram a caminhar somente sobre dois pés, seus olhos já não estavam mais voltados apenas para o solo, possibilitando-os a olhar para cima, e assim começar a imaginar. Logo percebeu-se que aqueles pontos brilhantes no céu contavam uma história, e que era preciso observá-los para compreendê-la. Foi assim, que há mais ou menos 30 mil anos atrás, inventamos a astronomia e começamos a compreender, passo-a-passo, um pouco mais sobre o Universo.

Estudar um outro planeta, é uma questão chave para entender muitos aspectos do nosso próprio, além de criar alternativas para uma futura expansão humana pelo vasto cosmo. Tendo isto em mente, e sendo de conhecimento geral que Marte é o planeta mais próximo da Terra, não só no quesito distância – mas também em suas chances de habitabilidade (ZUBRIN, 1996), estudá-lo de maneiras mais precisas é uma questão um tanto lógica quanto atrativa.

Sabendo que presentemente, a geofísica não se limita somente ao estudo do nosso planeta, mas também ao de outros corpos celestes – usando de conceitos e medidas baseados em termos físicos, este projeto visa apresentar a ideia do estudo atmosférico do planeta Marte utilizando a espectroscopia. Aproveitando-se de dados previamente coletados de missões realizadas pela *European Space Agency* (Estação Espacial Européia – ESA), em parceria com a *National Aeronautics and Space Administration* (Administração Nacional da Aeronautica e Espaço – NASA), distribuídos livremente para a comunidade acadêmica.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste projeto visa realizar uma análise das propriedades físicas de Marte, mais especificamente de sua atmosfera, visando a estimativa da composição química da mesma, usando a espectroscopia de raios infravermelho (IR).

Já o objetivo específico do projeto, foca-se no estudo e na verificação qualitativa do metano na atmosfera de Marte, sendo um dos traçadores de compostos orgânicos possivelmente presentes em regiões específicas do planeta.

3 JUSTIFICATIVA

Desde 1964, quando a sonda espacial Mariner 4 (EUA) passou fotografando Marte pela primeira vez, o Planeta Vermelho tem atraído a atenção e curiosidade de cientistas de várias áreas. Especialmente depois de lançada as missões Mariner 6 (EUA), em 1969, e Marte 2 (URSS), em 1971, quando se deu por início o estudo espectroscópico da atmosfera do planeta.

Atualmente, Marte é considerado o planeta do Sistema Solar com o maior número de missões exploratórias – fora a própria Terra (NASA, 2015). Sendo assim, a quantidade de dados disponíveis para estudos é abundante, a ponto de ainda existir um grande volume de informações a serem estudadas. (NELSON et al., 2001). Isto resulta em uma vasta área de dados e informações científicas que podem ser ainda mais exploradas. Reforçando esta ideia, em 2005 foi lançada uma chamada internacional realizada pelo *Mars Exploration Program* (Programa de Exploração de Marte – MEP), incentivando as universidades ao redor do mundo a abordarem os dados disponíveis, e contribuir com a comunidade científica em suas análises.

Apesar da facilidade para obtenção dos dados, a principal motivação para realizar este projeto é estar na fronteira atual do progresso científico, tanto em Geofísica Espacial quanto em Astronomia Planetária no Sistema Solar. E ainda, considerando a atual projeção de colonização do Planeta Vermelho, deve-se tomar profundo conhecimento sobre sua composição química e real possibilidade de manter vida em seu solo e atmosfera.

O presente projeto visa usar a espectroscopia como método, por ser bastante abrangente e poderosa na determinação das características de interesse. Os dados utilizados foram na região do infravermelho no espectro de luz, e estão disponibilizados no website do *Planetary Science Archives* (Arquivos de ciência planetária – PSA), distribuídos pela ESA, bem como no *Planetary Data System* (Sistema de dados Planetários – PDS), armazenados pela NASA.

4 O PLANETA MARTE

Marte (figura 1), batizado em homenagem ao deus romano da guerra, é o quarto planeta a partir do Sol e o último planeta do sistema solar considerado terrestre – grupo dos planetas que apresentam de modo geral uma atmosfera gasosa, com superfície sólida e interior em sua maior parte também sólido (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2004).

Figura 1 – Mosaico global do planeta Marte de 102 imagens tiradas pela Viking 1.



Fonte: Viking 1 Orbiter, NASA (1980).

De modo geral, Marte apresenta características geológicas muito semelhantes à Terra, devido à sua abundância de vales, crateras e até vulcões. Missões espaciais como a Viking 1 e 2 (1976), e a análise de meteoritos, proporcionaram aos cientistas um estudo global da composição geral da crosta ígnea marciana. Rochas da superfície de Marte são compostas principalmente de basaltos toleíticos formados por extensa fusão parcial e não apresentam um alto intemperismo (MCSWEEN et al., 2009). A superfície é, em sua maior parte, profundamente coberta por uma camada de pó de óxido de ferro III (CHRISTENSEN et al., 2003), o que dá a coloração vermelha ao planeta, sendo este o responsável pela origem da descrição de Marte como “o planeta vermelho”.

Considerando as características físicas, Marte é diferente da Terra, visto que apresenta 53,2% do seu diâmetro (6.786 km), 10,7% de sua massa ($6,4171 \times 10^{23}$ kg) e 15,1% de seu volume ($16,318 \times 10^{10}$ km³), apresentando assim, 37,8% ($3,71 / s^2$) da gravidade superficial da Terra (WILLIAMS, 2004). Na tabela 1, encontram-se mais informações sobre o planeta Marte em comparação com a Terra.

Tabela 1 – Comparativo de informações do planeta Terra e Marte

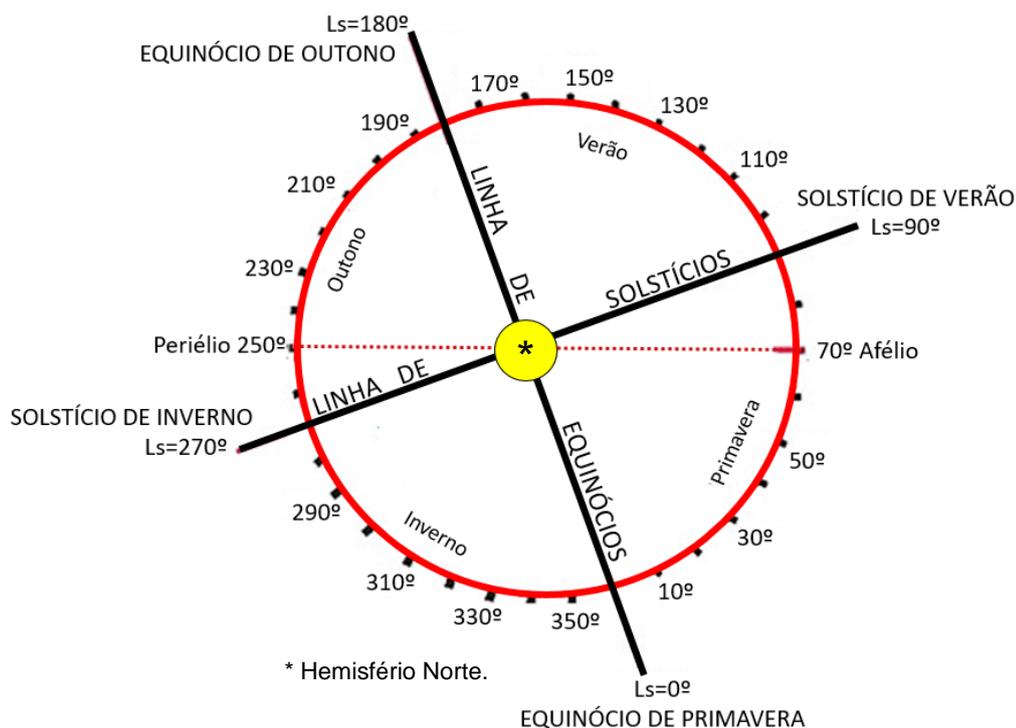
	Terra	Marte
Diâmetro equatorial	12.746 km	6.786 km
Massa	$6,0 \times 10^{24}$ kg	$6,4 \times 10^{23}$ kg
Volume	$108,321 \times 10^{10}$ km ³	$16,318 \times 10^{10}$ km ³
Gravidade na superfície	9,8 m/s ²	3,7 m/s ²
Distância média ao Sol	$149,6 \times 10^6$ km	$227,9 \times 10^6$ km
Duração do dia	23h56m	24h37m
Duração do ano	365,2d	686,9d
Inclinação do eixo	23° 27'	25° 00'
Temperatura (corpo-negro)	254 K	210 K
Satélites naturais	1	2

Fonte: WILLIANS, 2004; OLIVEIRA FILHO, 2004.

4.1 ORBITA

Marte apresenta uma inclinação de eixo de 25°, uma obliquidade muito semelhante ao do planeta Terra (tabela 1). Porém sua órbita é altamente elíptica (excêntrica), sendo um dos fatores que contribuem com que Marte tenha estações com durações bem maiores em comparação ao da Terra. Portanto, os dias, meses e anos em Marte, são medidos baseados em um esquema chamado Longitude Solar – L_s , que representa o ângulo entre a “linha” Marte-Sol, e a linha marciana de equinócios (figura 2). Os meses marcianos são definidos como o período em que L_s varia em 30 graus. Devido à excentricidade de sua órbita, estes meses podem variar de 46 até 67 Sois. A tabela 2 mostra com um maior detalhe informações sobre cada mês marciano. Finalmente, um Sol (dia marciano) equivale à 24 horas e 34 minutos, enquanto que seu ano apresenta 669 Sois – ou 687 dias terrestres. (NASA, 2015).

Figura 2 – Esquema da Longitude Solar de Marte e linhas de solstícios e equinócios do Hemisfério Norte.



Fonte: Modificado de Natural History Museum (2003).

Tabela 2 – Informações sobre os meses marcianos

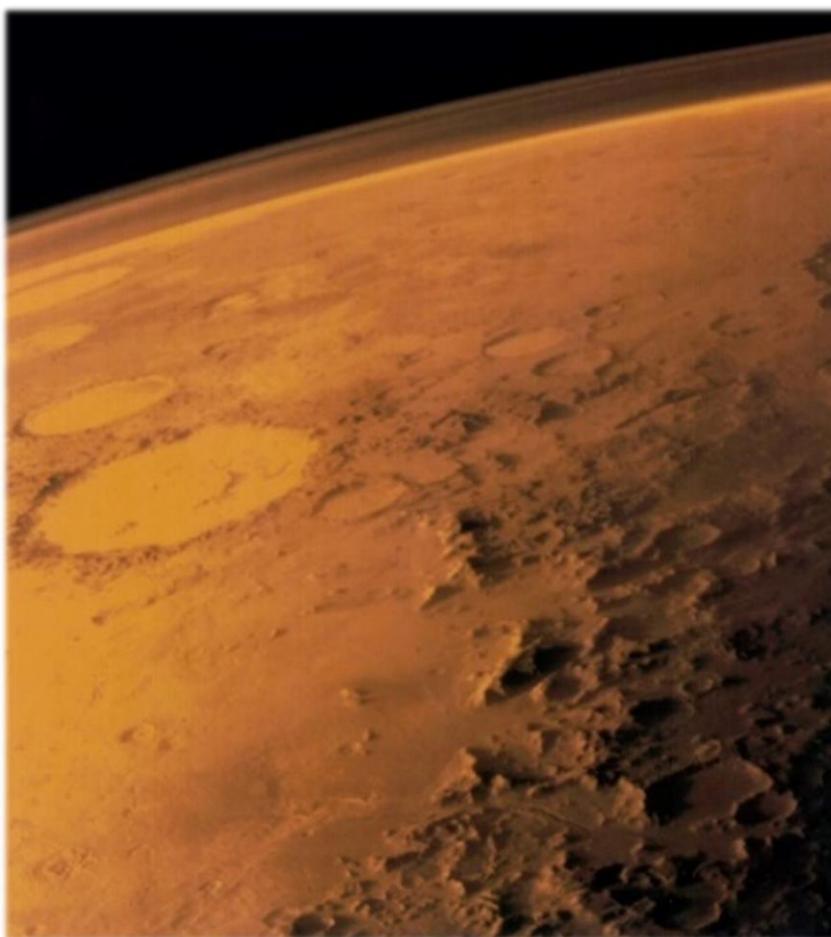
Mês	Varição Ls		Dia marciano (Sol)		Duração (Sol)	Especificidades (Hemisfério Norte)
1	0	30	0,0	61,2	61,2	Equinócio de primavera em Ls=0
2	30	60	61,2	126,6	65,4	
3	60	90	126,6	193,3	66,7	Afélio em Ls=71
4	90	120	193,3	257,8	64,5	Solstício do verão em Ls= 90
5	120	150	257,8	317,5	59,7	
6	150	180	317,5	371,9	54,4	
7	180	210	371,9	421,6	49,7	Equinócio de outono em Ls=180**
8	210	240	421,6	468,5	46,9	Período de tempestade de areia
9	240	270	468,5	514,6	46,1	Periélio em Ls=251
10	270	300	514,6	562,0	47,4	Solstício de inverno em Ls=270
11	300	330	562,0	612,9	50,9	
12	330	360	612,9	668,6	55,7	Fim do Período de tempestade

Fonte: NASA, 2015; Laboratoire de Météorologie Dynamique, 2010. ** - Início do per. de tempestade de areia.

4.2 ATMOSFERA

A atmosfera de Marte (Figura 3) é estimada como sendo cerca de 100 vezes menos densa do que a da Terra, a tornando bastante rarefeita – ou seja, bastante tênue e com uma baixa pressão atmosférica sobre a superfície (NASA, 2015). Na localização da Viking 1, por exemplo, a medida da pressão atmosférica varia de 6,9 mb a 9 mb (milibares), sendo que a média radial do planeta é em torno de 6.36 mb (WILLIANS, 2004). Na Terra, a pressão atmosférica em superfície é torno de 1013 mb (PIDWIRNY, 2006).

Figura 3 – Imagem capturada pela Viking 1 mostra a fina atmosfera de marte.



Fonte: Viking 1 Orbiter, NASA (1976).

A composição média da atmosfera marciana vem sendo estudada já há alguns anos devido às várias missões realizadas, apresentando uma média geral de elementos químicos, onde é constantemente aprimorada pela análise de novos dados de missões mais recentes, e a análise aprimorada de dados mais antigos. Em 1992,

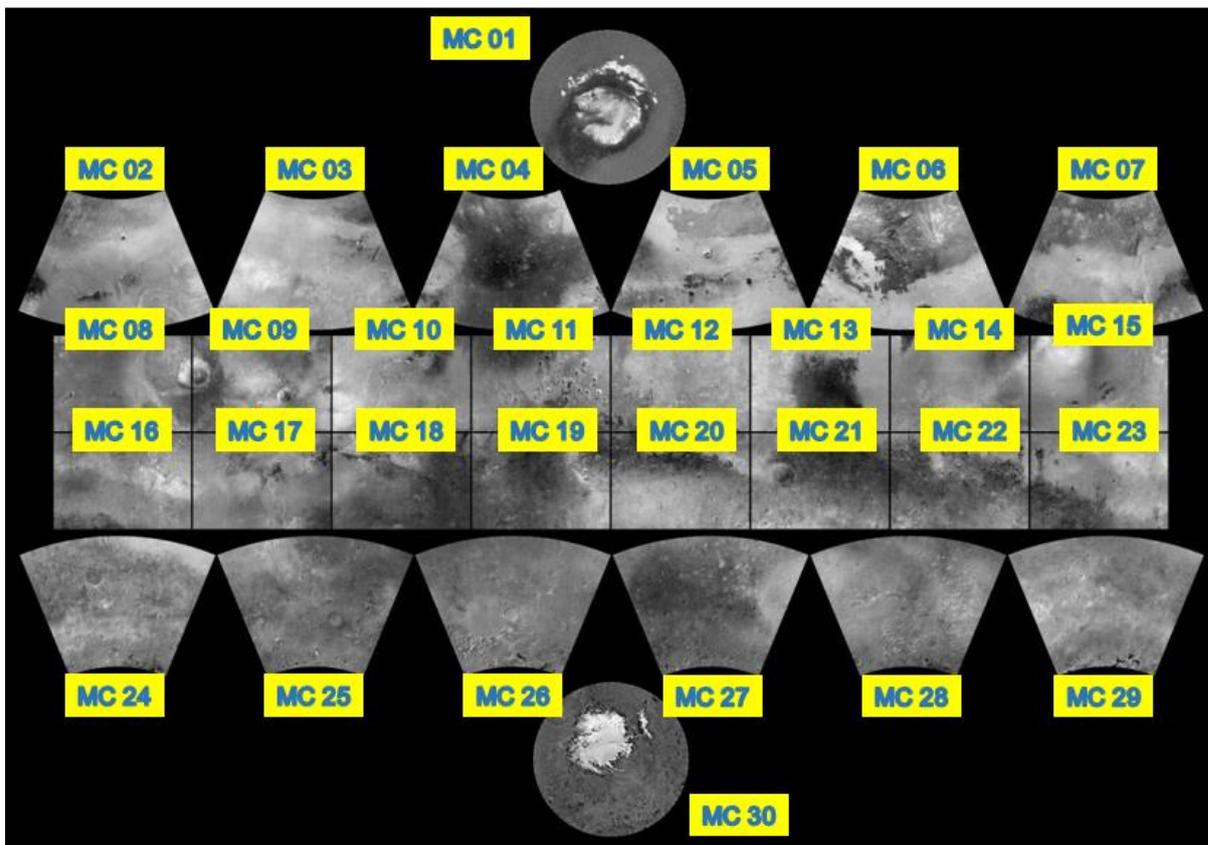
Owen lançou os resultados da primeira análise geral atmosférica do planeta Marte, mostrando que em sua maior parte, é composta por Dióxido de Carbono (~95%), Nitrogênio (~2,7%), Argônio (~1,6%), Oxigênio (0,13%) e Monóxido de Carbono (0,08%), além de outros elementos com concentrações ainda menores.

Um dos fatores que mais chamou a atenção para o estudo da atmosfera marciana nos últimos anos, a incluir este projeto, foi o descobrimento de pequenas quantidades de metano, o que levantou várias perguntas e hipóteses sobre sua origem, levando vários cientistas a crer em um provável processo vulcânico/hidrotermal ou até em uma possível presença de microrganismos do tipo metanogênicos – que possuem a capacidade de fabricar este gás (ESA Press, 2004). Para que isto seja analisado, é necessária uma varredura mais detalhada para encontrar quais regiões da atmosfera o metano está mais concentrado (FORMISIANO *apud* ESA Press, 2004).

4.3 SUBDIVISÃO DA SUPERFÍCIE

No que se refere ao estudo científico de Marte, em 1979, com atualização em 2002, o *Jet Propulsion Laboratory* (Laboratório de Propulsão a Jato – JPL), pertencente à NASA, em parceria com a *Malin Space Science Systems* (MSSS) e a *United States Geological Survey* (Serviço Geológico dos Estados Unidos – USGS) lançaram um modelo de subdivisão das regiões de Marte nas quais são compostas por 30 “quadrângulos” (figura 4), apresentando todas estas subdivisões numeradas, contendo o prefixo MC – que significa *Mars Chart*. A Região equatorial do planeta foi representada utilizando a projeção Mercator (MC-08 – 23), seguindo da projeção Cônica (MC-02 – 07, MC-24 – 28) para as latitudes médias e Estereográfica Polar para os polos. Os mapas apresentam uma escala de no mínimo 1:5.000.000, e são usados amplamente como referência da localização de áreas de estudo (JPL, 2002).

Figura 4 – Catálogo de imagens dos “quadrângulos” de Marte.

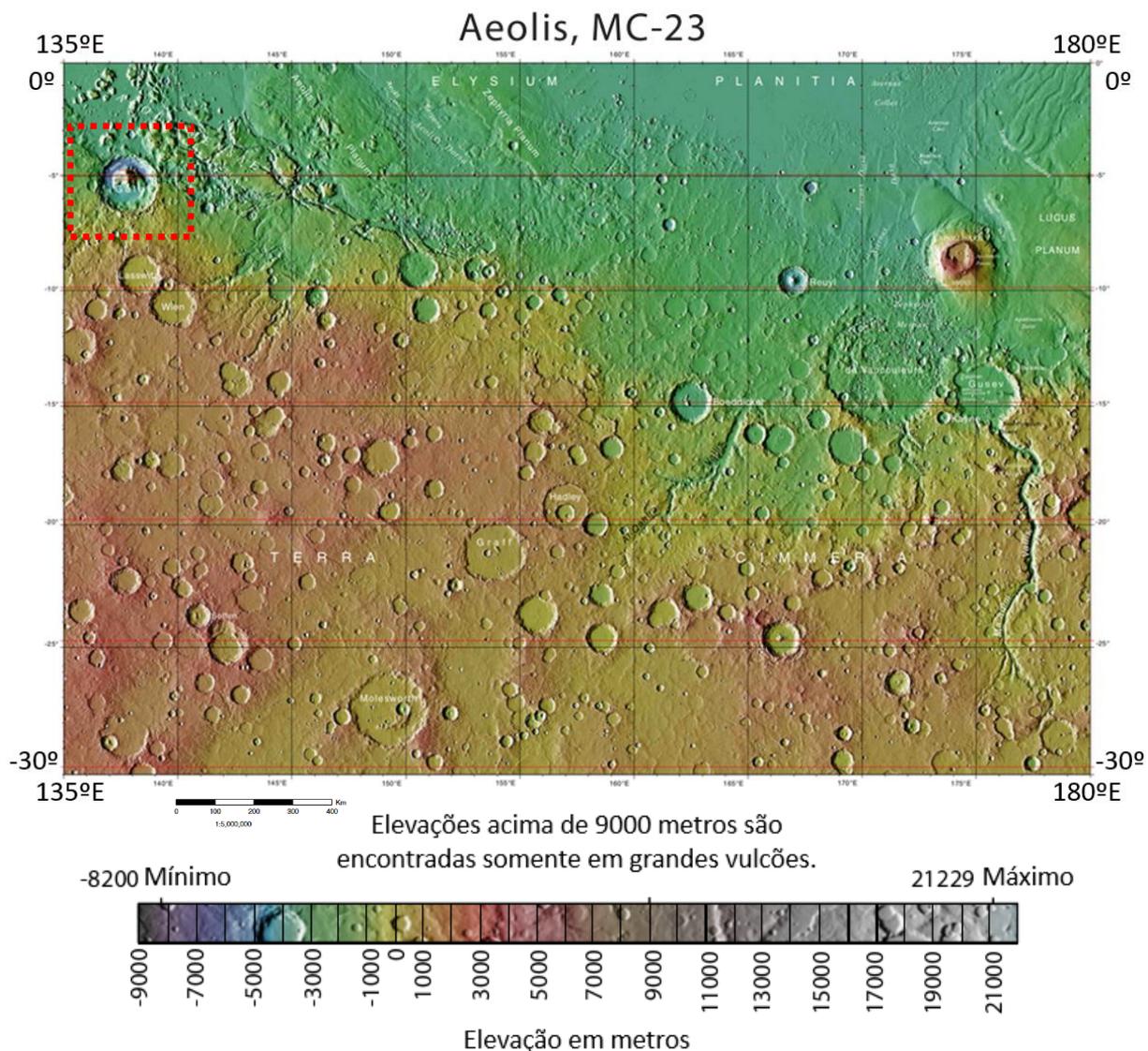


Fonte: Modificado de Jet Propulsion Laboratory – NASA (2002).

4.4 REGIÃO DE INTERESSE

O quadrângulo de Aeolis (figura 5), ou MC-23, cobre a região que vai de 0° a 30° Sul e 135° até 180° Leste. Este quadrângulo é considerado uma das regiões mais atrativas para os pesquisadores, pois apresenta desde vastas planícies (parte norte do quadrângulo), passando por vulcões (como o Apollinaris Mons, um vulcão tipo escudo com cerca de 5 quilômetros de altura), até regiões de terras altas, altamente craterizadas (JPL, 1998). A região também é conhecida por ser o local de aterrissagem de dois veículos espaciais: A MER-A (Mars Exploration Rover – A), popularmente conhecida como *Spirit* (2004), que pousou na cratera de Gusev, localizada em 14°S 175°E, e a *Curiosity* (2012), que pousou na cratera de Gale (figura 4, marcado em vermelho) – Ambos de missões realizadas pela NASA.

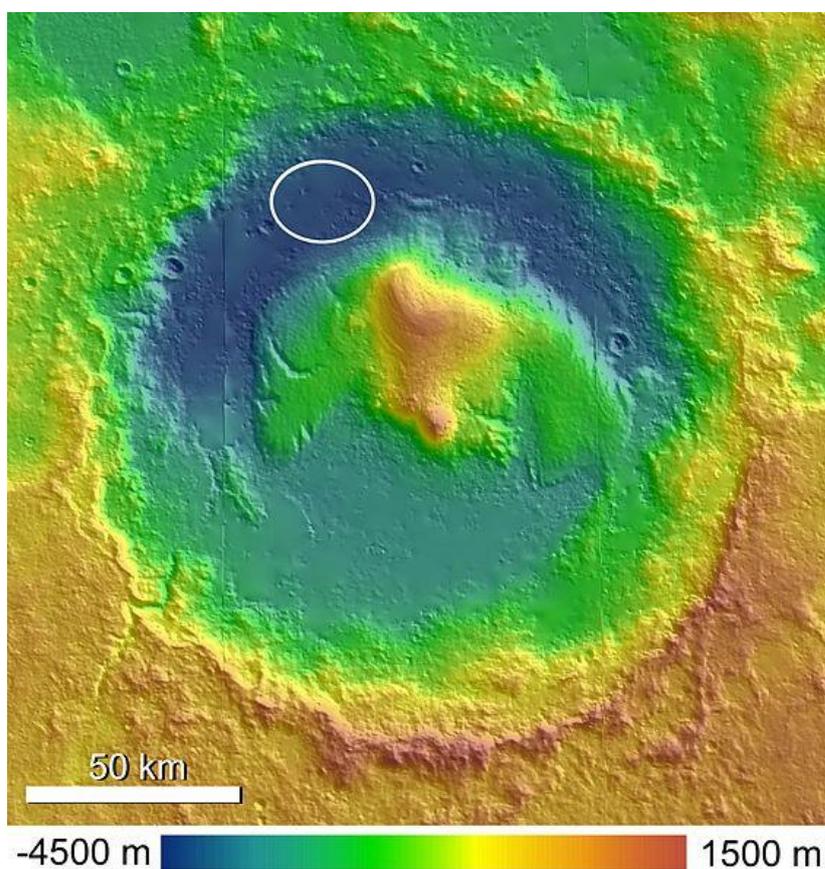
Figura 5 – Mapa topográfico do quadrângulo de Aeolis, com o objeto de estudo abordado por este projeto (em vermelho).



Fonte: Editado de USGS (2013).

A cratera Gale (figura 6) encontra-se na região noroeste do quadrângulo de Aeolis, nas coordenadas 5,2°S e 137,8°E. Sua estrutura apresenta em torno de 155 quilômetros de diâmetro, e baseado em seu estado de preservação, sua criação é estimada em 3,8-3,5 bilhões de anos atrás (NASA, 2012). A cratera tem seu nome dado em homenagem à Walter Frederick Gale – um banqueiro Australiano e astrônomo amador, que no século 19 descreveu canais e oásis em Marte, dentre outras observações (WOOD, 1981).

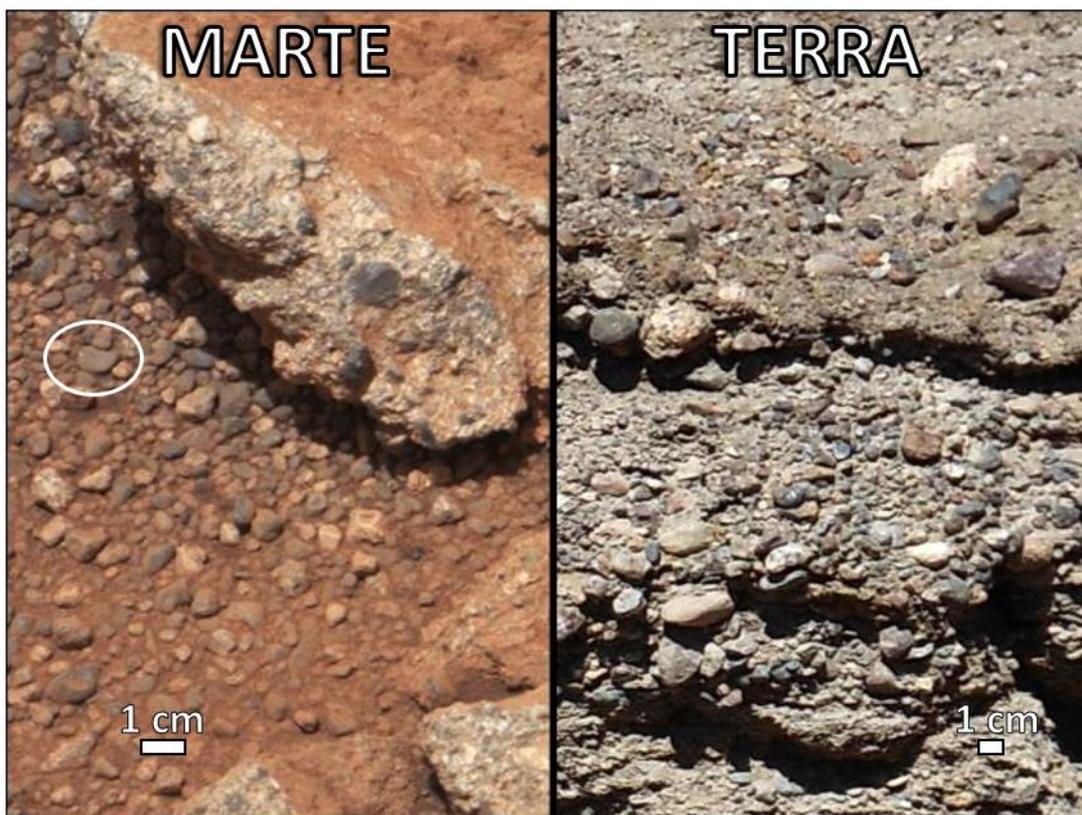
Figura 6 – Mapa topográfico da cratera de Gale, com a área de pouso determinada do Rover Curiosity.



Fonte: Mars Orbiter Laser Altimeter, - NASA (2003).

Gale foi escolhida para ser o destino do *Rover Curiosity*, pois o lugar apresenta diversos sinais de que água já se fez presente em determinados momentos ao longo de sua história, guardando assim, possíveis segredos sobre a existência de vida em Marte (NASA, 2012). A chave para o interesse no estudo da cratera, está no fato de haver uma montanha de detritos em volta de seu pico central, a *Aeolis Mons*, na qual apresenta uma das maiores – se não a maior – colunas estratigráficas sedimentares a céu aberto do planeta, com uma altura de quase três vezes mais do que a do famoso Grand Canyon, situado nos Estados Unidos (JPL, 2011). A base desta montanha é amplamente formada por rochas sedimentares (conglomerados de grãos arredondados) que lembram àquelas depositadas por rios e lagos, na Terra (figura 7), segundo as análises feitas pela Curiosity, em 2012.

Figura 7 – Amostra fotografada pela Curiosity na cratera Gale, em comparação com um conglomerado sedimentar formado por deposição fluvial.



Fonte: NASA/JPL-Caltech/MSSS (2012).

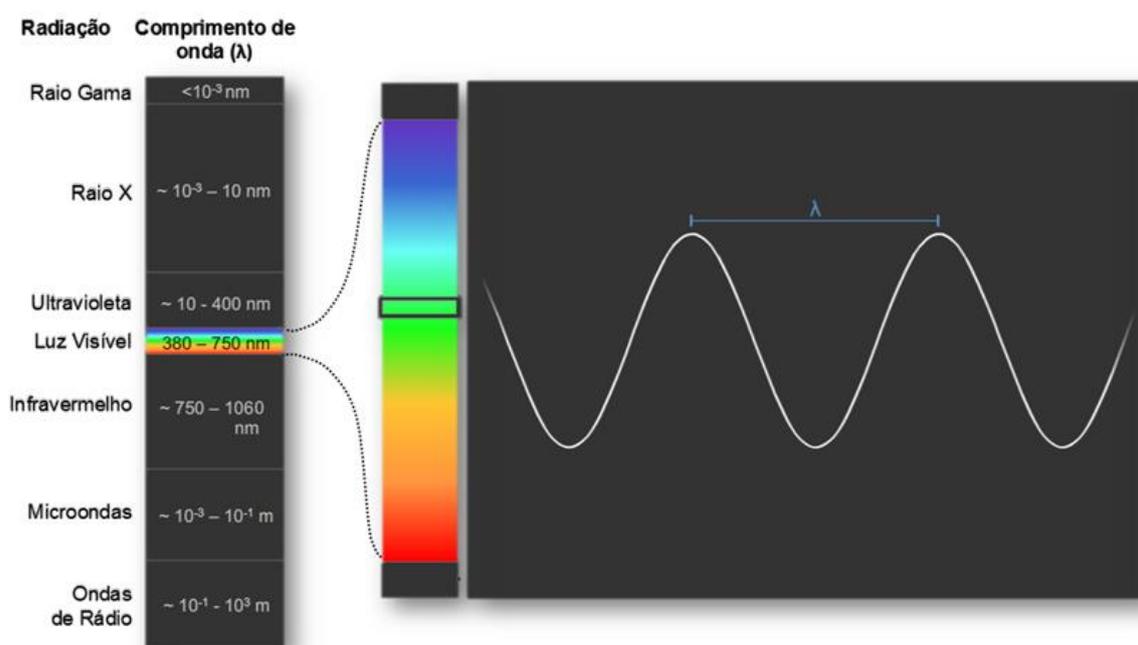
A figura 7 à esquerda, mostra em destaque (círculo branco) um grão de cascalho, com cerca de 1 centímetro e de bordas arredondadas. Isto sugere uma abrasão no transporte destes sedimentos (que pode ser feito pela água ou pelo vento). Porém, grãos de cascalho são considerados demasiadamente grandes para serem transportados pelo vento, levando a comunidade científica a crer que este arredondamento é ocasionado por um transporte fluvial. Este, juntamente de outros argumentos, sustenta a comprovação de que a cratera Gale possuía água em sua região, por longas e variadas eras geológicas (GROTZINGER et al., 2016).

Além de todas as informações geológicas, em 2013 a *Curiosity* começou a detectar quantidades incomuns de plumas de metano, que variam em escalas sazonais de tempo. Isto implica que Marte está continuamente produzindo e liberando metano para atmosfera, vindo de uma ou mais fontes que ainda são desconhecidas – reascendendo, cada vez mais, o intenso debate sobre a existência de vida bacteriana no planeta vermelho (WEBSTER et. al., 2015).

5 REVISÃO GERAL DOS FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Espectroscopia é o estudo detalhado da luz através de suas cores componentes, que são observadas quando a luz atravessa um prisma ou uma rede de difração (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2004). Esta sequência de cores é chamada de espectro, que é separado pelos seus diferentes comprimentos de onda (Figura 8), onde é possível detectar linhas de emissão e absorção, nas quais são relacionadas à específicas composições químicas (CALTECH/IPAC, 2003).

Figura 8 – Representação da porção do espectro composta pela radiação de luz visível.



Fonte: Editado de Royal Society of Chemistry (2015).

A espectroscopia é uma importante ferramenta em campos como a astronomia, química e geofísica espacial, pois com o espectro gerado do componente observado, é possível estudar e estabelecer além da composição química, sua temperatura, densidade e em casos de estrelas e planetas distantes, seu movimento – ou seja, a rotação do objeto de estudo e o quão rápido está se afastando ou aproximando do observador (TIPLER, 2008).

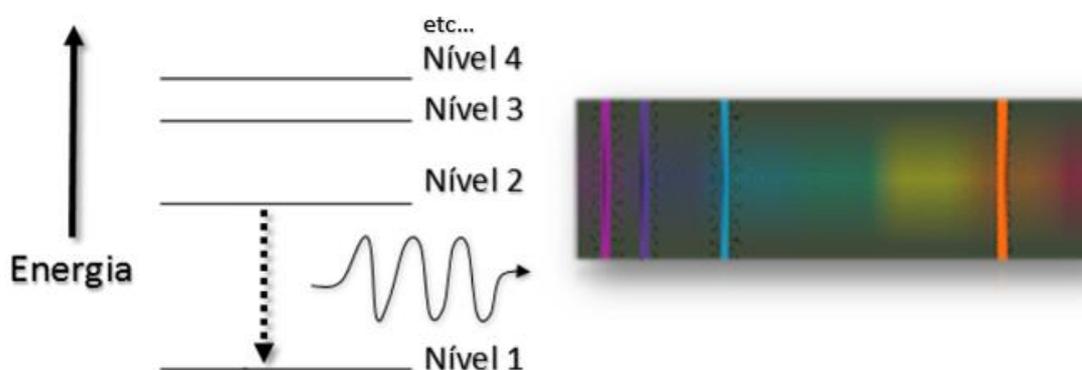
5.1 ESPECTRO

Tipicamente, é possível observar três classes distintas de espectro: *contínuo*, de *emissão* e de *absorção* (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2004).

Espectros contínuos surgem de gases densos ou objetos sólidos que irradiam o calor para longe através da produção de luz. Tais objetos emitem luz sobre uma vasta gama de comprimentos de onda, assim, o espectro visível se mostra liso e contínuo, como pode ser observado em lâmpadas incandescentes e predominantemente em estrelas (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2004).

Espectros de emissão (Figura 9) consistem em quando um gás pouco denso produz traços de linhas brilhantes no espectro, sendo que a posição (cor) e a quantidade dessas linhas dependem dos elementos químicos presentes no gás (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2004). Isso acontece pois, quando átomos de um elemento químico estão excitados em um nível mais alto de energia, estes tendem a voltar ao seu estado de mínima energia (estado fundamental), emitindo assim, um fóton de comprimento de onda bem definido com uma quantidade precisa de energia para o retorno (TIPLER, 2008).

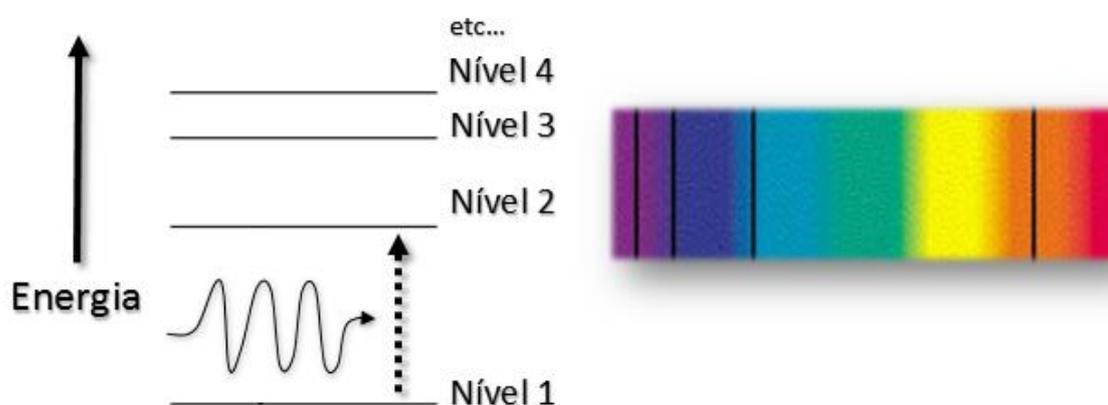
Figura 9 – Comprimentos de onda emitidos para o retorno de um átomo de hidrogênio ao seu estado fundamental.



Fonte: Editado de Caltech/IPAC (2003).

Espectros de absorção são gerados quando um gás mais frio absorve linhas específicas do espectro (figura 10), que são usadas pelos componentes químicos do objeto de estudo para aumentar o nível de energia de seus átomos (TIPLER, 2008). Um gás mais frio absorve mais radiação do que emite e, portanto, gera as linhas escuras observadas, sendo que estas linhas não significam ausência de luz, mas sim o contraste de menos luz (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2004).

Figura 10 – Comprimentos de onda absorvidos para a excitação de um átomo de hidrogênio que está em seu estado fundamental.



Fonte: Editado de Caltech/IPAC (2003).

Convencionalmente, o comprimento de onda do espectro observado é mostrado em nanômetros (nm), ou micrometros (μm), conforme a região estudada. Porém em espectroscopia do Infravermelho (IR), opta-se por utilizar o número de onda ($\bar{\nu}$), em cm^{-1} , devido a praticidade de estar na mesma ordem de grandeza da frequência de calibração dos equipamentos. A conversão é dada por:

$$\bar{\nu}(cm^{-1}) = \frac{10^4}{\lambda(\mu m)} = \frac{10^7}{\lambda(nm)} \quad (1)$$

sendo:

$\bar{\nu}$ = número de onda;

λ = comprimento de onda.

5.2 RADIÂNCIA E ABSORBÂNCIA

Na física, radiância (eq. 2) é a quantidade de um fluxo radiante (eq. 3) emitido ou recebido (ou seja, a quantidade de energia eletromagnética emitida ou recebida por uma unidade de tempo) por uma unidade de ângulo sólido por unidade de área projetada (MARSCHNER, 2012). Esta nomenclatura é bastante utilizada por indicar o quanto da energia emitida, refletida, transmitida ou recebida por uma superfície será recebida pelo sistema óptico de um equipamento em um determinado campo de visão.

$$L_{e,\Omega} = \frac{\partial^2 \Phi_e}{\partial \Omega \partial A \cos \theta'} \quad (2)$$

sendo:

$L_{e,\Omega}$ = radiância de uma superfície;

Φ_e = fluxo radiante emitido, ou absorvido;

$\partial/\partial \Omega$ = derivada parcial em função do ângulo sólido;

$\partial/\partial A \cos \theta'$ = derivada parcial em função da área projetada.

O fluxo radiante dá se por:

$$\Phi_e = \frac{\partial Q_e}{\partial t} \quad (3)$$

sendo:

Φ_e = fluxo radiante;

Q_e = energia eletromagnética emitida ou absorvida;

$\partial/\partial t$ = derivada parcial em relação ao tempo.

Quando se calcula a radiância emitida por um objeto, A refere-se à uma área na superfície do objeto, e Ω ao ângulo sólido em que a luz é emitida. Por outro lado, quando se calcula a radiância recebida por um detector específico, A refere-se a uma área na superfície do detector, e Ω para o ângulo sólido subtendido do objeto de estudo, visualizado a partir desse detector (MARSCHNER, 2012).

Absorbância é um valor que mede a atenuação (perda gradual da intensidade) de um fluxo radiante transmitido em um determinado material. É apresentado como logaritmo na base 10 da razão entre o fluxo radiante incidido e transmitido. Sendo expresso por:

$$A = \log_{10} \left(\frac{\Phi_e^i}{\Phi_e^t} \right) \quad (4)$$

sendo:

A = absorvância de um material;

Φ_e^i = fluxo radiante recebido por este material;

Φ_e^t = fluxo radiante transmitido por este material.

Tipicamente, a absorvância de uma substância é medida usando a espectroscopia de absorção, onde um feixe de luz atravessa um material, no qual um detector mede a quantidade de fótons e quais comprimentos de onda estão sendo transmitidos. Usando-se destas informações, os comprimentos de onda que foram absorvidos podem ser determinados (REUSCH, 2013). Com estas linhas específicas de absorção em diferentes comprimentos de onda, é possível identificar diferentes elementos e compostos, como o metano, por exemplo.

5.3 METANO

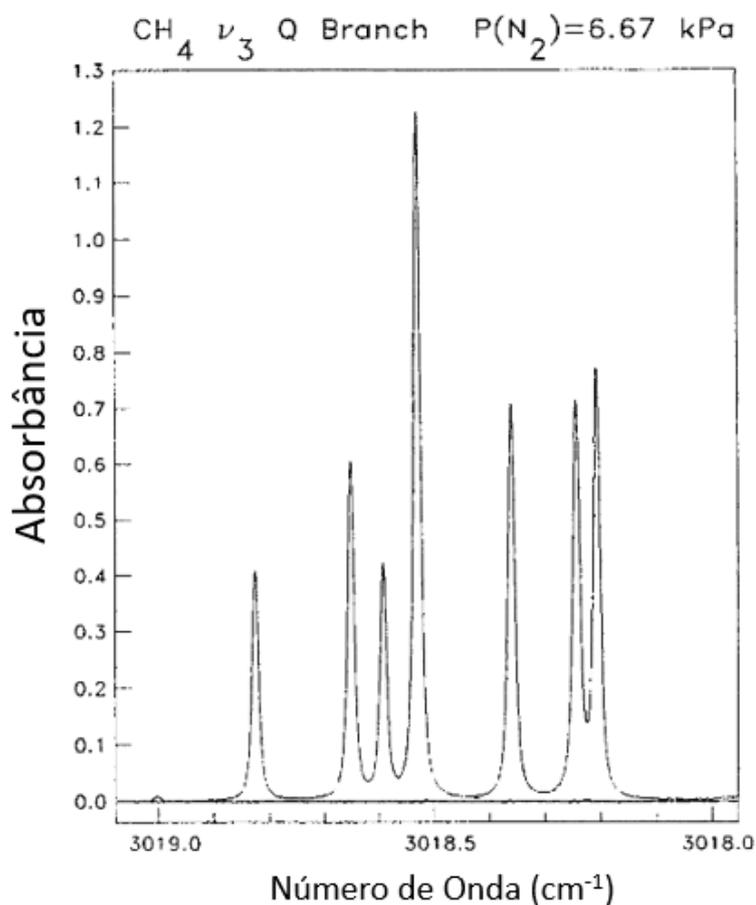
De fórmula CH_4 , o metano é um componente químico formado por 5 átomos: 4 átomos de hidrogênio e 1 átomo de carbono. Faz parte do grupo dos hidrocarbonetos – mais especificamente dos Alcanos, sendo reconhecido como o mais simples componente desta categoria e o principal componente do gás natural, porém seu valor científico vai além de sua busca para prospecção de combustível fóssil.

Há bilhões de anos atrás, quando a Terra estava dando seus passos iniciais rumo à evolução biológica, arqueobactérias denominadas metanogênicas reinavam sobre um planeta com concentrações mínimas de gás oxigênio (O_2), e altas concentrações de gás Hidrogênio (H_2). Estas bactérias usavam H_2 como um doador de elétron para efetuar a transformação (ou redução) de Dióxido de Carbono (CO_2), liberando assim, grandes quantidades de gás metano (AAAS – 1996).

As bactérias metanogênicas podem ser encontradas até hoje em ambientes com uma depleção grande de oxigênio (anaeróbicos) – O que é exatamente o ambiente proposto pelo planeta Marte (Seção 4).

Hoje, o metano é um componente amplamente estudado pela espectroscopia, na região do infravermelho. Nestes comprimentos de onda, o composto apresenta duas bandas fortes de absorção – A frequência fundamental ν_3 , localizada em 3018 cm^{-1} (figura 11), e a ν_4 , localizada em 1036 cm^{-1} (NELSON et al., 1948).

Figura 11 – Espectro de absorbância do metano em sua banda fundamental, a ν_3 Q-Branch.



Fonte: Modificado de Pine (1992).

Sabendo do comportamento do metano nestes comprimentos de onda específicos, diversos equipamentos espectrométricos (e.g. PFS, seção 7) são utilizados para determinar a concentração deste composto em diferentes objetos de estudo – como Marte, por exemplo.

5.3.1 METANO EM MARTE

A descoberta de diferentes níveis de metano na atmosfera de Marte, com variações sazonais e regionais, realizados por estudos espectrométricos e *in situ*, são alvos de intensa discussão na comunidade acadêmica por diversos fatores: A atmosfera de Marte não é capaz de manter o elemento por muito tempo, sendo que estimativas feitas por Krasnopolsky et al., em 2004, sugerem que o metano teria um tempo de vida de aproximadamente 340 anos, indicando que as produções do gás necessitam ser de origem recente. No mesmo artigo, os autores também afirmaram que ocorrências abiogênicas (produção por hidrotermalismo e vulcanismo) de metano em Marte são bastante improváveis devido às condições específicas do planeta, mostrando por exemplo, que os últimos sinais de atividade vulcânica em Marte, aconteceram há mais de dez milhões de anos. Outro ponto observado no artigo é o fato do metano não ser uniformemente dissipado na atmosfera, corroborando ainda mais com o conceito de ocorrências constantes de liberação de metano para a atmosfera, de uma possível fonte biogênica.

Tais ocorrências foram posteriormente confirmadas pela *Rover Curiosity* (WEBSTER et. al., 2015), como já tratado na Seção 4.1. Vale ressaltar que até a data de hoje, nenhuma prova definitiva sobre a origem destas contínuas liberações de metano na atmosfera marciana (de ocorrência biogênica ou abiogênica), foi encontrada.

6 TRABALHOS ANTERIORES NA ÁREA DE ESTUDO

Como tratado anteriormente, o estudo da atmosfera de Marte vem sendo vista pela comunidade científica com bastante atratividade. Devido às várias missões realizadas para uma análise cada vez mais completa do planeta vermelho, hoje existe um número muito grande de estudos que envolvem a sua atmosfera.

Bertaux et al. (2004) foram os primeiros cientistas a publicar um estudo da estrutura global e a composição da atmosfera marciana usando o SPICAM. No estudo, foram analisados em detalhe os níveis de ozônio e sua ligação com H₂O, bem como os níveis de aerossóis e a estrutura vertical da temperatura atmosférica e da ionosfera. Foi usado o canal infravermelho (IR) principalmente para detecção de H₂O, e para perfis verticais de H₂O e aerossóis, que auxiliaram no desenvolvimento de modelos

iniciais meteorológicos e atmosféricos que vão desde a superfície até 160 km de altitude. Já as observações em ultravioleta (UV) da atmosfera superior visaram estudar a ionosfera e sua interação direta com o vento solar. Este estudo foi o marco precursor para a compreensão dos mecanismos de escape, que junto com a missão *Mars Atmosphere Evolution Mission* (Missão de Evolução da Atmosfera de Marte – MAVEN) realizada em 2013, explicaram a evolução a longo prazo da atmosfera.

Fedorova et al. (2006) iniciaram os estudos da distribuição sazonal e geográfica de vapor d'água presente na atmosfera de Marte, utilizando o canal próximo ao infravermelho (Near-IR) do SPICAM, operando no alcance espectral de 1–1,7 μm . O experimento foi considerado um êxito devido ao sucesso em recriar as distribuições espaciais e sazonais de H_2O .

Já McDunn et al. (2009) abordaram a meia atmosfera marciana (60-130 km) com o objetivo de desenvolver um conjunto de dados climatológicos (temperatura e densidade) desta área, a partir de análises do SPICAM no período de um ano marciano.

No que consiste ao estudo de traçadores orgânicos, Formisano et al. (2004), foram os primeiros a detectar metano usando o PFS a bordo da Mars express. O artigo relata uma média global de 10 partes por bilhão por volume (ppbv), porém com uma variação de 0 até 30 ppbv em certas regiões do planeta. Isso foi considerado pelos autores um forte indicio de concentrações locais de metano, indicando a existência de mecanismos de produção deste composto, de origens até então desconhecidas.

Já em 2008, Encrenaz realizou observações e interpretações sobre diferentes dados que possibilitaram a detecção do metano em Marte. Utilizando-se de vários resultados apresentados por observações feitas pelo PFS e espectroscópios de alta resolução situados na Terra, foi chegado à conclusão de que até então, era necessário um estudo mais detalhado e com mais precisão das regiões de Marte, para que pudesse ser confirmada que de fato existem regiões em Marte com distribuições muito acima do usual, no planeta.

Então em 2011, Geminale et al. utilizaram o PFS a bordo da *Mars Express*, para mostrar o comportamento sazonal do metano em todo o planeta, com a análise em curtos comprimentos de onda que mostraram a variabilidade espacial do gás e como ele é transportado na atmosfera, devido ao ciclo de CO_2 . Além disso, foi constatado um aumento de metano na atmosfera de Marte na região polar-norte

durante o verão local, sugerindo assim, um possível reservatório de metano associado com a calota polar do planeta.

As dúvidas sobre o metano foram reacendidas em 2015, quando Webster et al. divulgaram um relatório constatando que a *Rover Curiosity* confirmou pela primeira vez com medidas realizadas em superfície (mais precisamente situadas na cratera de Gale), a presença de metano na atmosfera de Marte. A *Rover* detectou plumas de metano que variam episodicamente e até o momento carecem de explicações definitivas. Medidas analisadas entre um período de 20 meses, constataram níveis de metano atmosférico de aproximadamente 0,69 ppbv. Porém em 4 medidas sequenciais em um período de 60 sóis, a *Rover Curiosity* acabou detectando números muito elevados de metano, com concentrações maiores que 7 ppbv. Isso confirmou de vez que o planeta produz metano em certos períodos de tempo, vindo de uma ou mais fontes que até então são desconhecidas.

7 MATERIAIS UTILIZADOS

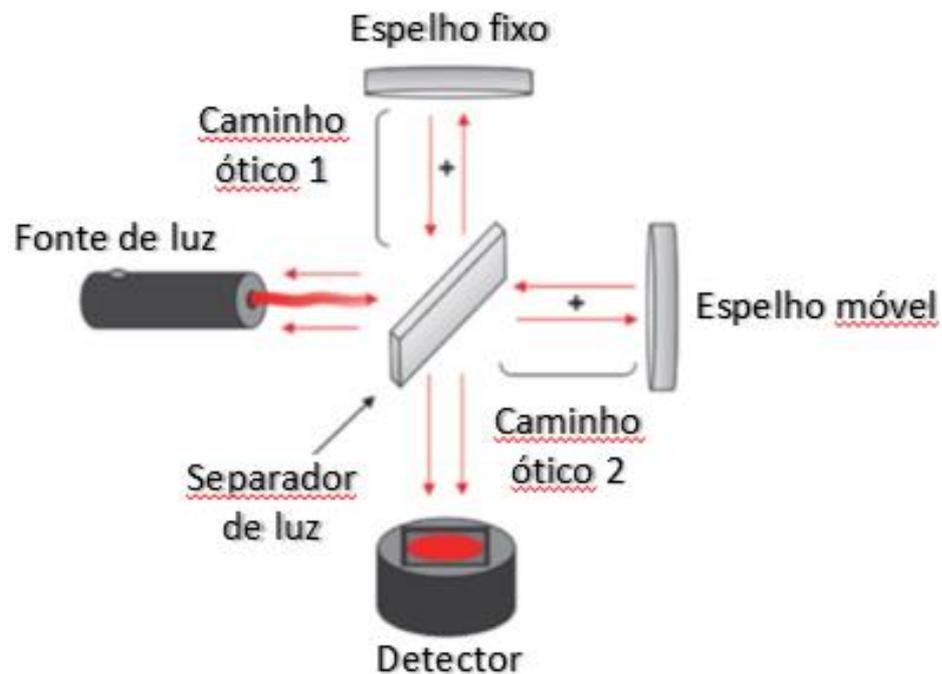
O presente projeto utilizou-se dos dados coletados com o *Planetary Fourier Spectrometer* (Espectrômetro Planetário de Fourier – PFS), abordo da missão *Mars Express* realizada pela ESA (2003), em parceria com a *Agenzia Spaziale Italiana* (Agência Espacial Italiana – ASI). O software/linguagem de análise e processamento dos dados até então utilizado foi o Interactive Data Language (Linguagem de Dados Interativa - IDL), distribuído pela *Exelis Visual Information Solutions* (Exelis VIS). Este foi especialmente escolhido por já apresentar rotinas de programação pré-estabelecidas e abertas, para a leitura dos dados coletados pelos equipamentos abordo da MEP.

7.1 PFS

O PFS é basicamente um interferômetro de Michelson (figura 12) de pêndulo duplo (ou seja, divide a luz em quatro caminhos óticos distintos), que opera na região do infravermelho, entre 1,2–45 μm . Essa região é subdividida em dois canais: *Short Wave* (SW), para comprimentos de onda que vão de 1,2–5,5 μm ; e *Long Wave* (LW), para comprimentos de onda entre 5,5–45 μm . Ambos os canais apresentam uma resolução espectral de 1,3 cm^{-1} , no qual proporciona ao equipamento a capacidade

de representar até mesmo traços de componentes químicos presentes em pequenas quantidades na atmosfera – como o metano, por exemplo. (FORMISIANO et al., 1997, 2005).

Figura 12 – Configuração óptica de um modelo clássico de interferômetro de Michelson.



Fonte: Editado de imagem fornecida por Drissen et al., (201?).

No modelo clássico de interferômetro de Michelson, a luz captada pelo aparelho é dividida em dois feixes distintos: Um dos feixes é refletido para um espelho de posição fixa, que por sua vez é refletido de volta, em direção ao detector; O outro feixe, é direcionado para o espelho que pode ter sua posição alterada, sendo este o responsável pela criação de diferentes tipos de padrões de interferência. Quando os dois feixes de luz percorrem a mesma distância (caminho óptico), sua combinação resulta em um padrão de interferência construtivo, ao passo que se o caminho óptico for um múltiplo de $\frac{\lambda}{4}$, a interferência será destrutiva (TIPLER, 2010).

O PFS leva a palavra “Fourier” em seu nome devido à integração de um processador capaz de aplicar uma *Fast Fourier Transform* (Transformada Rápida de Fourier – FFT), no qual é responsável por converter a imagem do padrão de interferência gerado, em um espectro – selecionando certas faixas espectrais de interesse para transmissão de dados para a Terra (FORMISIANO et al., 2004).

A Transformada de Fourier pode ser compreendida como uma mudança no domínio de uma função, transformando-a do domínio espacial, para o domínio da frequência. A equação 5 representa a FT em termos matemáticos.

$$F(\omega) = FT(f(x)) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{i\omega x} dx \quad (5)$$

sendo:

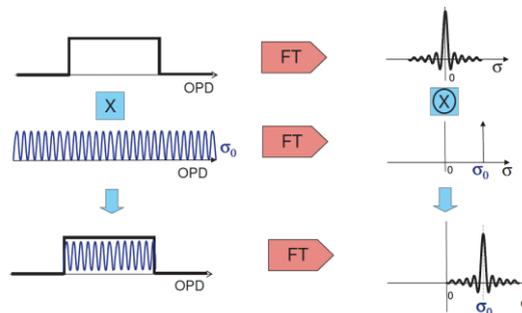
$F(\omega)$ = Função no domínio da frequência;

$f(x)$ = Função no domínio do espaço;

ω = Frequência angular

A Transformada Rápida de Fourier é uma solução numérica (baseada em um algoritmo computacional) para a integral mostrada na equação 5. Em um padrão de interferência, todas as informações estão aproximadamente na mesma posição espacial, e para separá-las é necessária a utilização de um método matemático conhecido como Convolução. A vantagem do uso do FFT em espectrômetros como o PFS, se dá pelo simples fato de que a convolução no domínio do espaço se transforma em um produto de funções, no domínio da frequência (figura 13).

Figura 13 – Representação visual da Transformada de Fourier. Lado direito: Domínio espacial; Lado esquerdo: Domínio da frequência.



Fonte: Editado de imagem fornecida por Drissen et al., (2017).

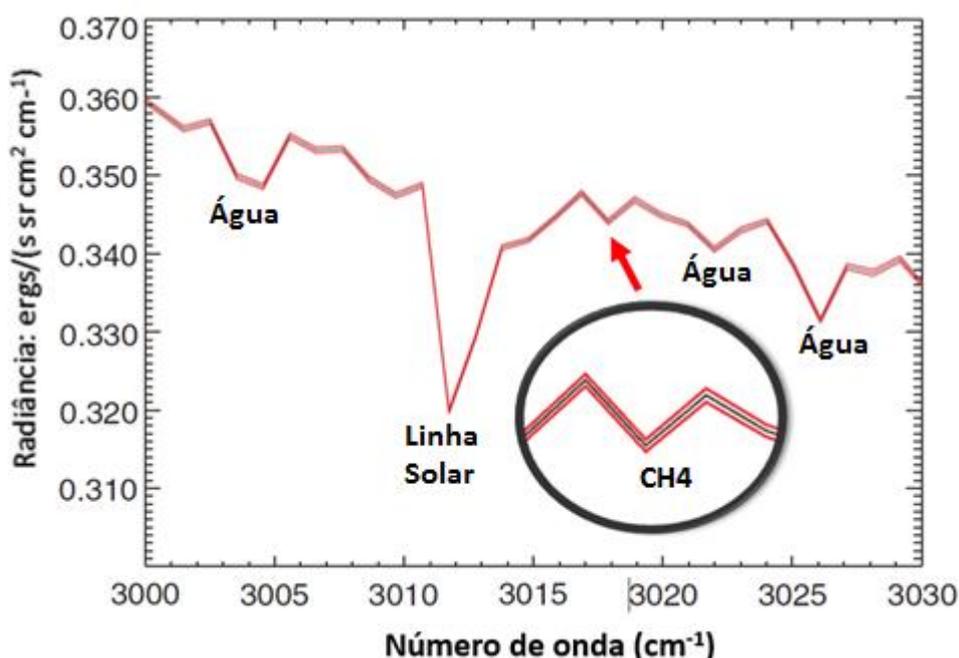
O PFS foi designado para coletar medidas primariamente em seu pericentro (período em cada órbita em que o objeto se encontra mais próximo do planeta), no qual ocorre entre 250 – 300 quilômetros, para a Mars Express (FORMISIANO et al., 1997). Esta proximidade com o planeta resulta em um campo de visão (*Field of View* – FOV) de cerca de 1,6° para o canal SW e 2,8° para o canal LW, no qual representa uma resolução espacial de 7 e 12 quilômetros, respectivamente. Isso gera em torno de 330 medições por órbita, sendo destas, 270 em direção a marte (modo Nadir), e 60 para calibrações. (FORMISIANO et al., 2005).

7.1.1 LINHAS DE ABSORÇÃO DO METANO

Segundo Formisiano et al. (2004), quatro bandas de CH_4 se enquadram no alcance espectral do PFS: 1300, 3000, 4400 e 6000 cm^{-1} – Porém muitas delas apresentam diversos problemas na nitidez para sua identificação, devido a diversos fatores. O artigo mostra que a banda localizada a 6000 cm^{-1} não é adequada para a detecção das fracas assinaturas do CH_4 pois apresenta várias linhas solares de Fraunhofer marcantes, além da ausência de uma referência de espectro solar nesta região para ter condições de subtrair estas linhas. As linhas de Fraunhofer são linhas de absorção percebidas no espectro do Solar, o qual possui seu maior pico de emissão justamente na faixa em torno do 6000 cm^{-1} . (RUTTEN, 200?)

Nas regiões de 4400 e 1300 cm^{-1} , é citada algumas evidências de assinaturas espectrais de espécie menor, porém a SNR (Razão Sinal-Ruído) encontrada nestas regiões, são muito inferiores às que podem ser vistas na região de 3000 cm^{-1} . Sendo assim, foi definido que para este equipamento, a melhor banda para se identificar o metano é centralizada em 3018 cm^{-1} (figura 14), pois além da região não possuir nenhuma sobreposição com relação às linhas espectrais de outros gases, é também a mais forte banda fundamental do elemento (FORMISIANO et al., 2004).

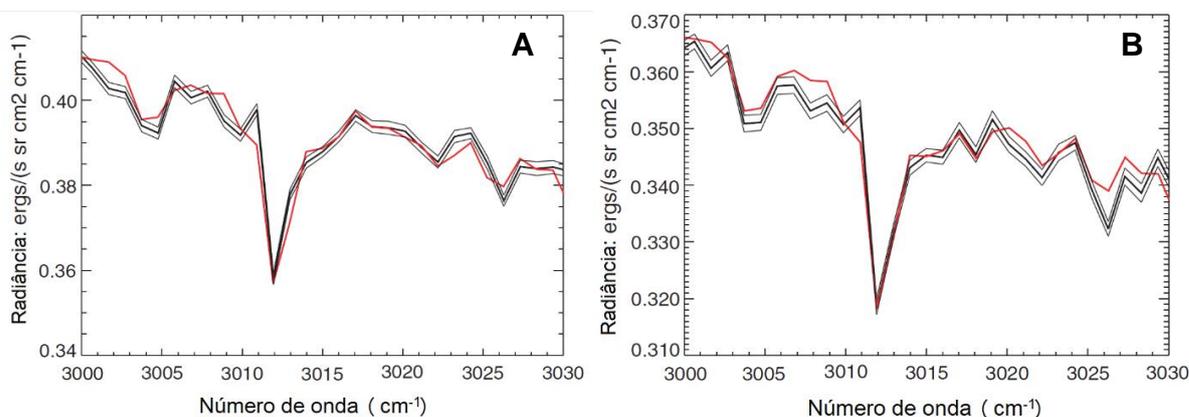
Figura 14 – Linha de absorção de metano (seta em vermelho, a 3018 cm^{-1}) detectado em um espectro gerado pelo PFS. Outras detecções também são evidenciadas.



Fonte: Modificado de Formisiano et al., (2004).

No PFS, as linhas de absorção de metano apresentam características bastantes evidentes no espectro. Em 2004, Formisiano et al. argumenta que a profundidade da linha de absorção na região de 3018 cm^{-1} , aumenta quase que linearmente com o aumento da concentração de metano na região estudada, sendo que este fato é usado para identificar e estudar as variações da concentração do metano. A figura 15(a) mostra o comportamento típico de um espectro médio, com uma concentração de metano de 0 ppbv (em preto). Em comparação, a figura 15(b) demonstra o comportamento típico de um espectro que apresenta uma concentração de metano de 35 ppbv (em preto). A linha vermelha representa o espectro sintético utilizado com os valores de metano correspondentes.

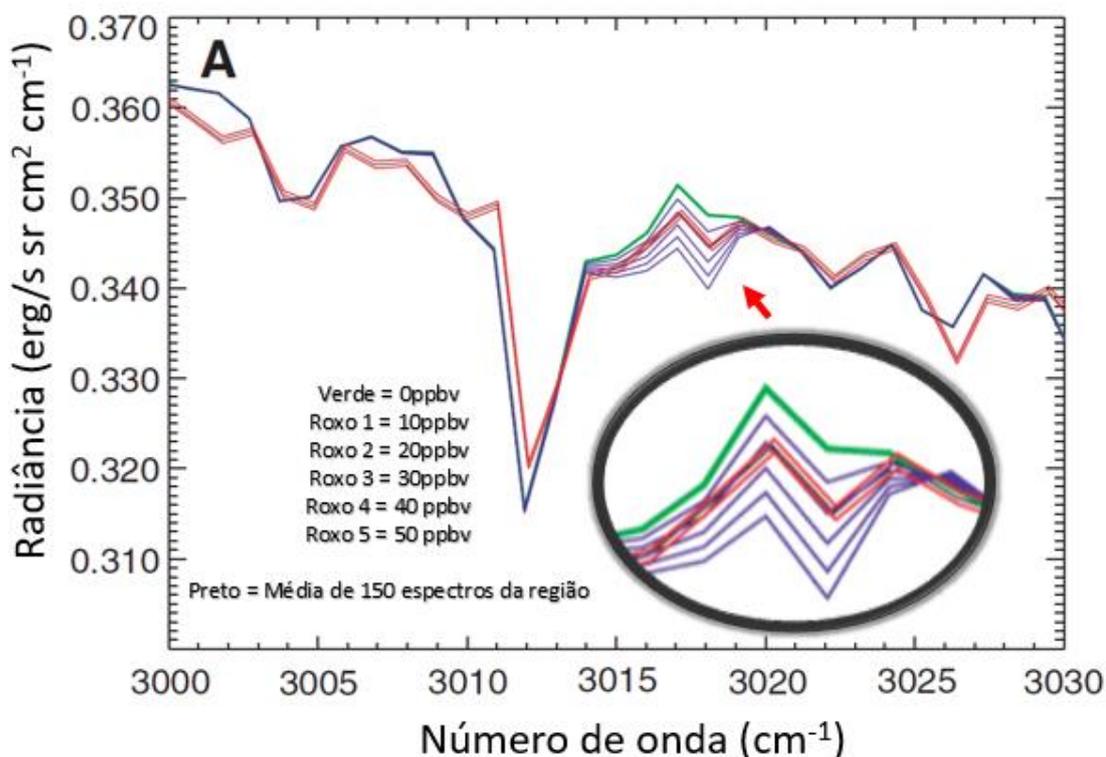
Figura 15 – Espectros com diferentes valores de metano. (A) 0 ppbv, (B) 35ppbv.



Fonte: Modificado de Formisiano et al., (2004).

Comparando um espectro médio com um espectro sintético que utiliza como base um algoritmo de melhor ajuste (figura 16), é perceptível a tendência de crescimento linear da linha de absorção do metano, de acordo com a quantidade de metano presente no local estudado. Com este algoritmo, que simula o comportamento do espectro usando diferentes níveis de metano, é possível observar a evolução que a região de 3018 cm^{-1} apresenta, desde o seu comportamento suavizado quando computado com 0 ppbv (figura 16, em verde), até seu pico bastante acentuado de absorção quando computado com 50 ppbv. Infelizmente, este projeto não contará com a criação de um espectro sintético (devido à falta de dados cruciais para sua confecção, que são considerados materiais privados pela ESA). Porém com base na literatura apresentada, buscará estes tipos de comportamentos específicos na região de 3018 cm^{-1} , para auxiliar a identificação do metano nas regiões de estudo abordadas.

Figura 16 – Exemplo de um método de quantificação do metano em um espectro gerado (algoritmo de melhor ajuste – espectro sintético).



Fonte: Modificado de Formisiano (2004).

7.2 DADOS

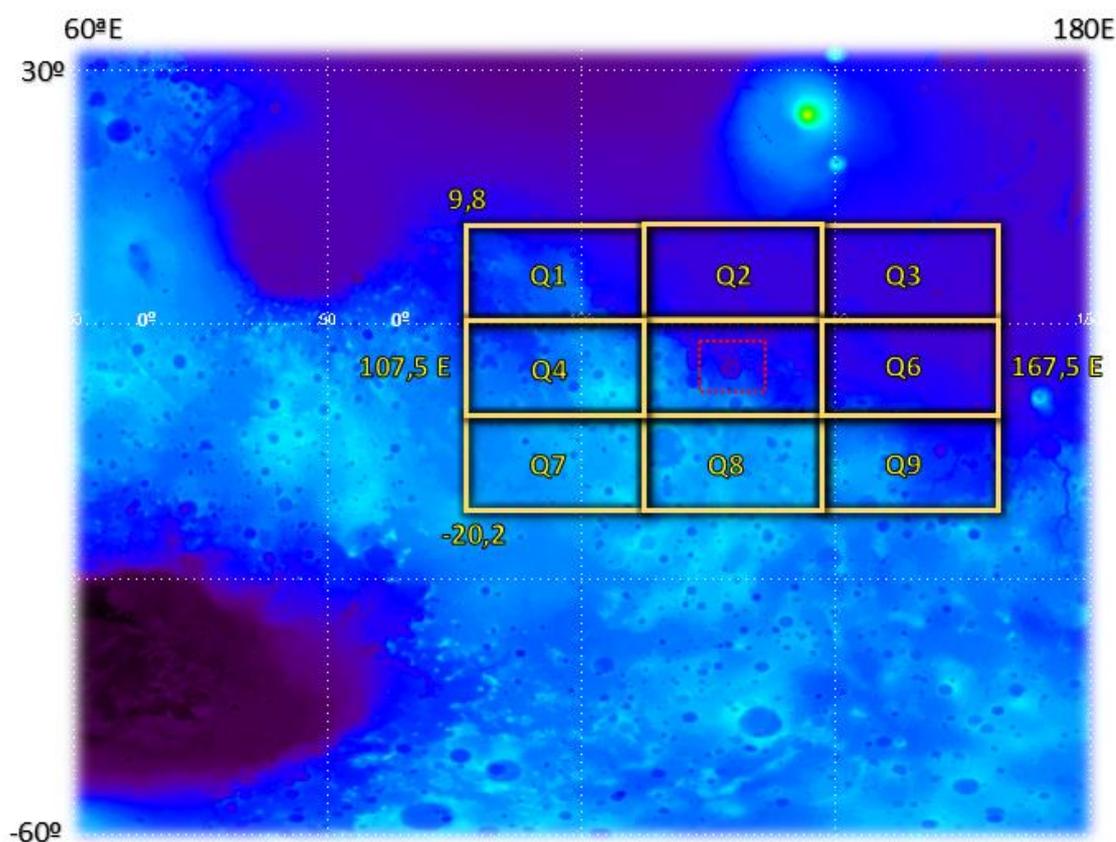
Presentemente, é possível obter os dados completos de cinco etapas das missões realizadas pelo PFS, que variam do ano de 2003 até 2011, contemplando mais de 9.000 órbitas. Para esta pesquisa, foi escolhido a *Extended Mission 2* (Missão Estendida 2 – EXT2), por esta possuir cerca de 2.800 órbitas, nas quais compreendem o tempo necessário para se ter medidas durante um ano marciano completo. A missão EXT2 se inicia na órbita 4.809 (1 de outubro de 2007) e vai até a órbita 7.689 (31 de dezembro de 2009).

Ao efetuar o download da missão escolhida, é possível verificar a presença de quatro pastas principais: *CALIB*, *DATA*, *GEOMETRY* e *SOFTWARE*. A pasta *CALIB* contém as tabelas de calibração necessárias para calibrar os dados; A pasta *DATA* guarda as medidas realizadas pelo PFS (os dados “crus”, e informações dos parâmetros de aquisição); A pasta *GEOMETRY* apresenta as geometrias das observações realizadas; e a pasta *SOFTWARE* possui as rotinas pré-estabelecidas para a leitura dos dados disponíveis.

8 SEPARAÇÃO DAS REGIÕES DE ESTUDO

A figura 17, mostra as regiões delimitadas para a análise dos espectros observados usando o PFS durante um ano marciano. As regiões de estudo compreendem uma área total de $30^{\circ} \times 60^{\circ}$, subdivididas em 9 quadrantes de $10^{\circ} \times 20^{\circ}$ cada, com o objeto de principal interesse (Cratera de Gale) localizado ao centro do esquema, no quadrante Q5 (em vermelho). Esta geometria foi escolhida com o intuito de analisar não só as variações temporais da região de interesse, mas também as variações espaciais com relação às regiões circundantes.

Figura 17 – Representação da subdivisão das regiões de estudo do presente projeto.



Fonte: Autor (2016).

Apesar do PFS apresentar um campo de visão (FOV) de cerca de $1,8^{\circ}$ para o SW (o que teoricamente seria o espaçamento necessário entre regiões para se obter uma análise do objeto de estudo), há outros fatores que devem ser levados em consideração para determinar o valor dos espaçamentos atualmente utilizados.

Como já discutido anteriormente, o metano é um composto raro na atmosfera marciana, fazendo-se necessária a utilização da combinação de vários espectros

(muitas vezes em diferentes órbitas) para que o composto se torne mensurável. Isso afeta a resolução espacial do equipamento, pois não existe garantias de que cada medida realizada se encontra sempre na mesma posição. Além do mais, o presente projeto visa o estudo sazonal das regiões delimitadas, o que implica obter o maior número de órbitas durante um período, no menor espaço possível. Sendo assim, ao realizar a análise prévia dos dados coletados, definiu-se a presente configuração como a mais “otimizada” para os objetivos tratados.

Outro fator importante levado em consideração para a escolha da geometria baseou-se no conceito de minimizar o chamado *Noise Equivalent Radiation* (Radiação de Ruído Equivalente – NER), descrito por Formisiano et al, em 2004, no qual representa a quantidade de radiação necessária para equivaler aos ruídos térmicos internos do detector do equipamento, ao ponto que a SNR seja igual a 1. Isso é feito também utilizando a média de diferentes espectros, no qual resulta na diminuição do NER por um fator igual à raiz quadrada do número de espectros somados aumentando, conseqüentemente, o SNR pelo mesmo fator (eq. 6). Isso significa que, quanto maior a quantidade de espectros representando o mesmo local, menor será o NER e maior será o SNR, ou seja:

$$SNR = \frac{Rad \sqrt{N_{spec}}}{NER} \quad (6)$$

Sendo:

SNR = Razão Sinal-Ruído do espectro gerado;

Rad = Radiância média do espectro gerado;

N_{spec} = Número de espectros somados;

NER = Radiação de Ruído Equivalente (Valor fixo de $0,010 \text{ erg/s/cm}^2/\text{sr/cm}^{-1}$)

Análises laboratoriais descritas por Formisiano et al, em 2004, mostraram que o menor valor de NER no PFS é encontrado na região de 3000 cm^{-1} ($0,045 \text{ erg/s/cm}^2/\text{sr/cm}^{-1}$), sendo esta a região espectral mais favorável para detectar constituintes de menor concentração. Coincidentemente, a banda fundamental mais evidente do metano pode ser encontrada nessa região (Seção 5.3). As medidas realizadas no espaço acabaram confirmando esta região de mínimo NER, sendo que em Marte o valor mínimo é de $0,010 \text{ erg/s/cm}^2/\text{sr/cm}^{-1}$. (FORMISIANO et al., 2004).

8.1 PROCESSAMENTO

Como descrito anteriormente, o presente projeto utiliza o programa IDL, bem como de rotinas pré-estabelecidas distribuídas pela ESA para a leitura dos dados coletados pelo PFS, sendo estas modificadas para os objetivos de interesse do autor.

Primeiramente, é delimitado os limites espaciais e temporais da área de estudo a ser estudada. Para isso, foi utilizado a rotina “*Select Geometry*” contendo as informações apresentadas na tabela abaixo:

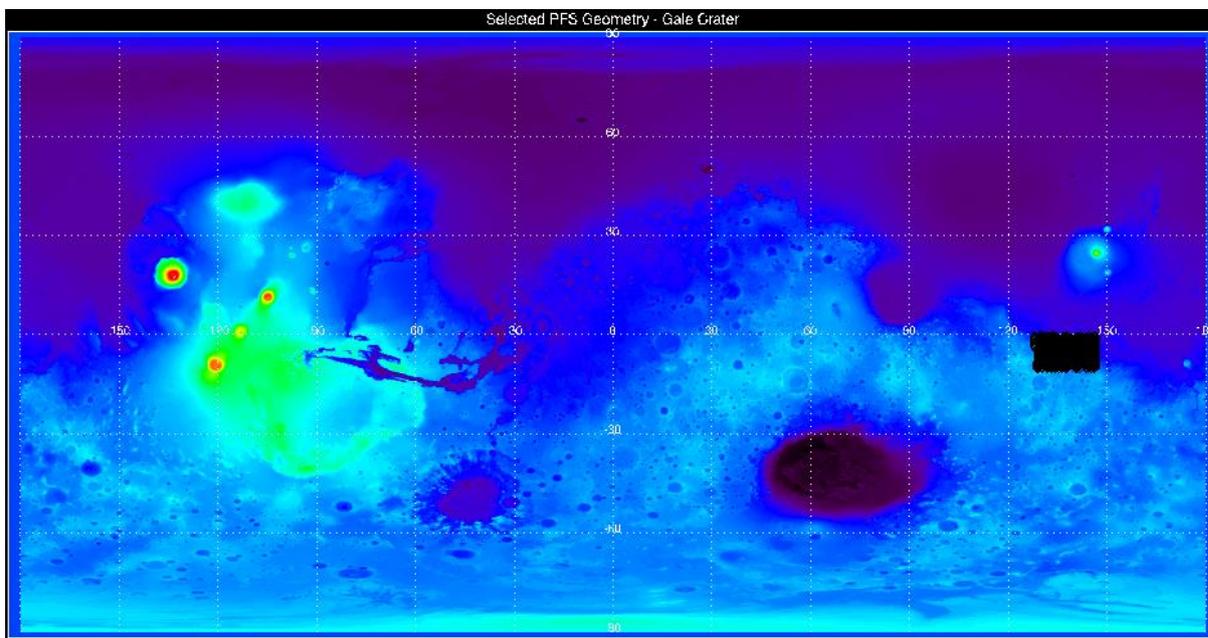
Tabela 3 – Variáveis para delimitação espacial e temporal dos dados

Variável	Entrada (input)	Região Q5
lat	Latitude selecionada [-90, 90]	-5,2
lon	Longitude selecionada [0, 360]	137,5
ls	Longitude Solar do período selecionado [0, 360]	45
inc	Ângulo de incidência solar máximo [0, 180]	90
dlat	Tolerância da latitude selecionada [°]	5
dlon	Tolerância da longitude selecionada [°]	10
dls	Tolerância da longitude Solar selecionada [°]	45

Fonte: SINDONI (2011).

Na tabela acima, pode ser encontrado os exemplos de entrada modificados da rotina para delimitar a região Q5, e separar todas as medidas realizadas dentro do quadrante no período de primavera ($L_s = 0, 90$). Ao executar a rotina modificada com os parâmetros determinados, é necessário indicar as geometrias das medidas realizadas (localizadas na pasta *GEOMETRY*), gerando um arquivo de saída (no formato “.txt”) contendo todas as informações de cabeçalho necessárias para a separação correta dos dados que interessam. Por fim, é também gerada uma imagem que indica graficamente a localização espacial em que as medidas foram coletadas. (figura 18).

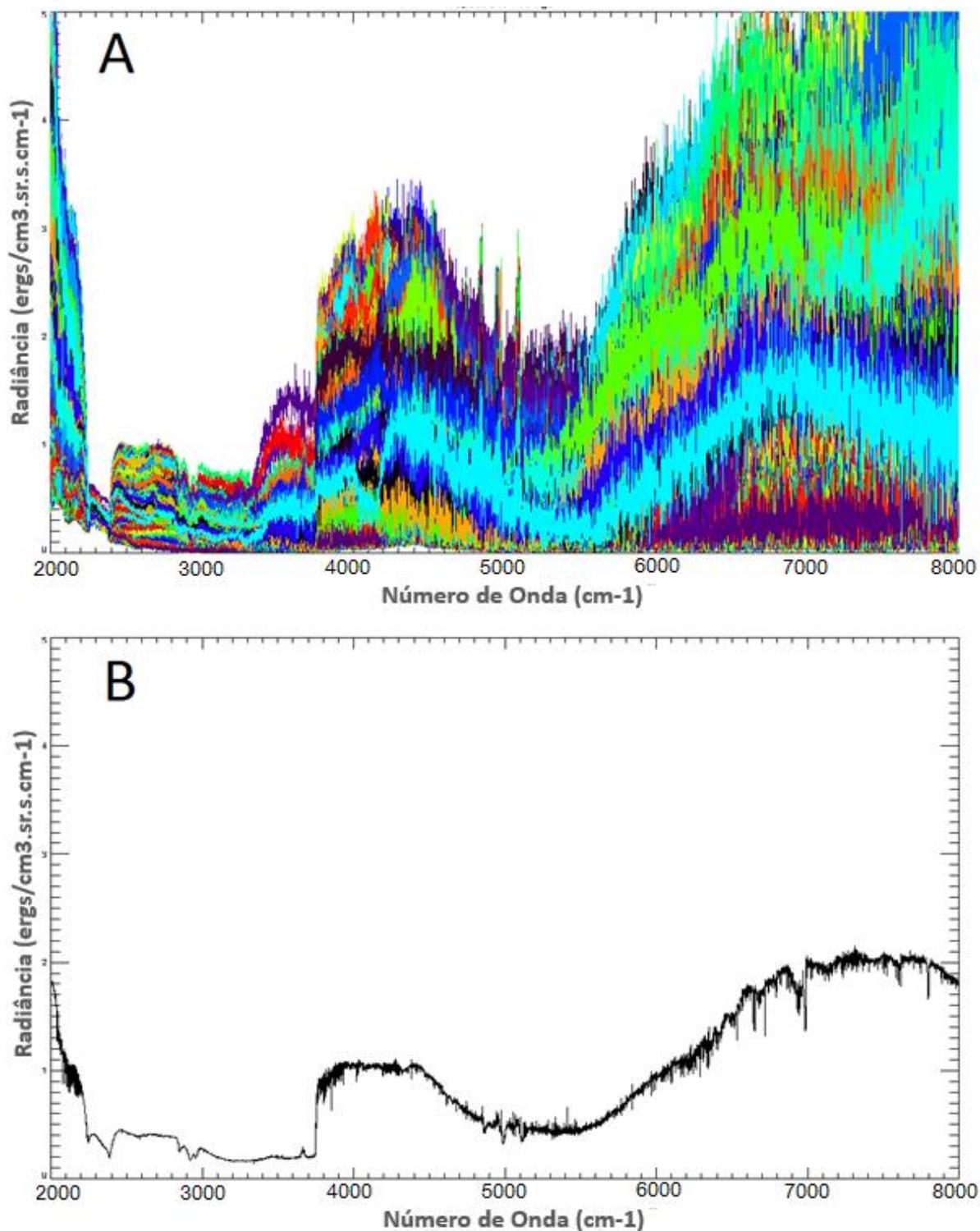
Figura 18 – Representação gráfica da localização espacial das medidas coletadas (em preto), para os parâmetros determinados (Q5).



Fonte: Autor (2016).

Após a separação da geometria, é necessário calibrar e somar os espectros encontrados para a região e período determinado (conforme explicado na seção 8). Para realizar esta tarefa, foi modificada e executada a rotina *Averaged Spectra*, cujo parâmetro de entrada é o arquivo “.txt” gerado no passo anterior, o diretório dos dados colhidos pelo equipamento (*DATA*), e a pasta que contém as tabelas de calibração do equipamento (*CALIB*). Como saída, a rotina gera um arquivo “.sav” contendo o espectro médio calibrado, além de gerar dois gráficos: Um com todos os espectros sobrepostos (figura 19, A) e outro com a média tirada de todos estes espectros (figura 19, B).

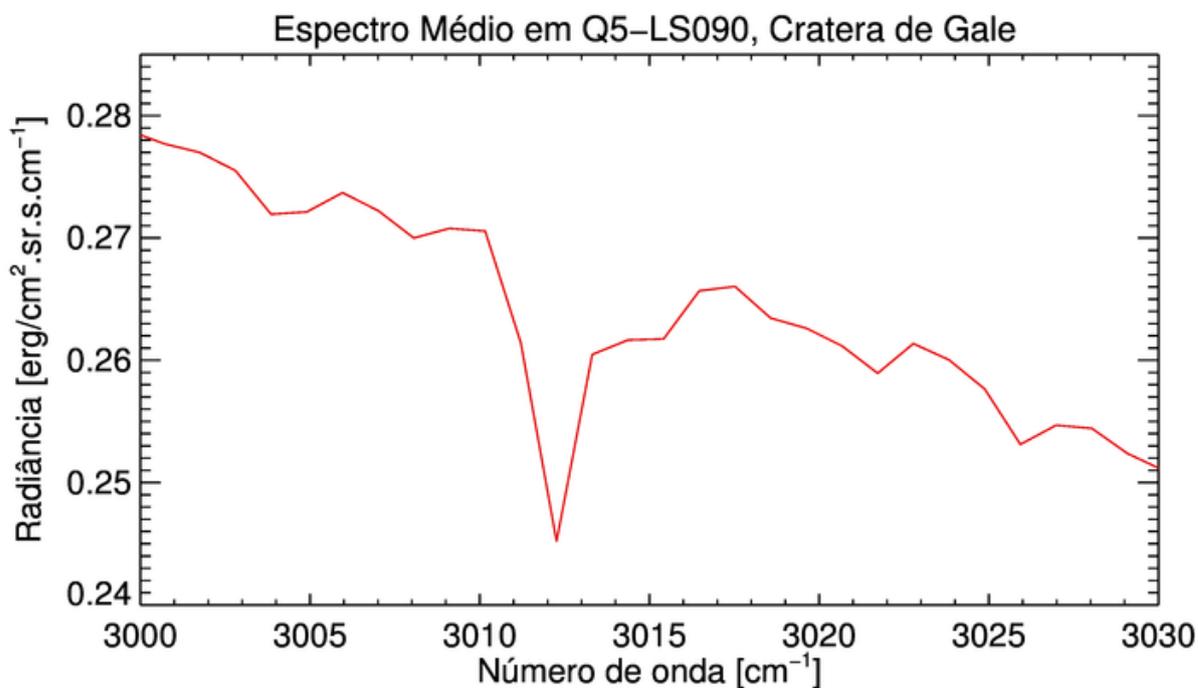
Figura 19 – Gráficos com todos os espectros medidos (A) e espectro médio gerado (B), da região Q5 no período da primavera (Ls 0, 90). Gráfico (A) apresenta uma deslocação vertical positiva para melhor ilustração do processo.



Fonte: Autor (2016).

Finalmente, foi desenvolvido uma rotina especialmente voltada à separação das regiões espectrais de interesse deste projeto. Essa parte do arquivo “.sav”, anteriormente criado, para criar um espectro no intervalo de número de onda e radiância de interesse. No presente trabalho, utilizou-se o intervalo de número de onda entre 3000cm^{-1} e 3030cm^{-1} (figura 20).

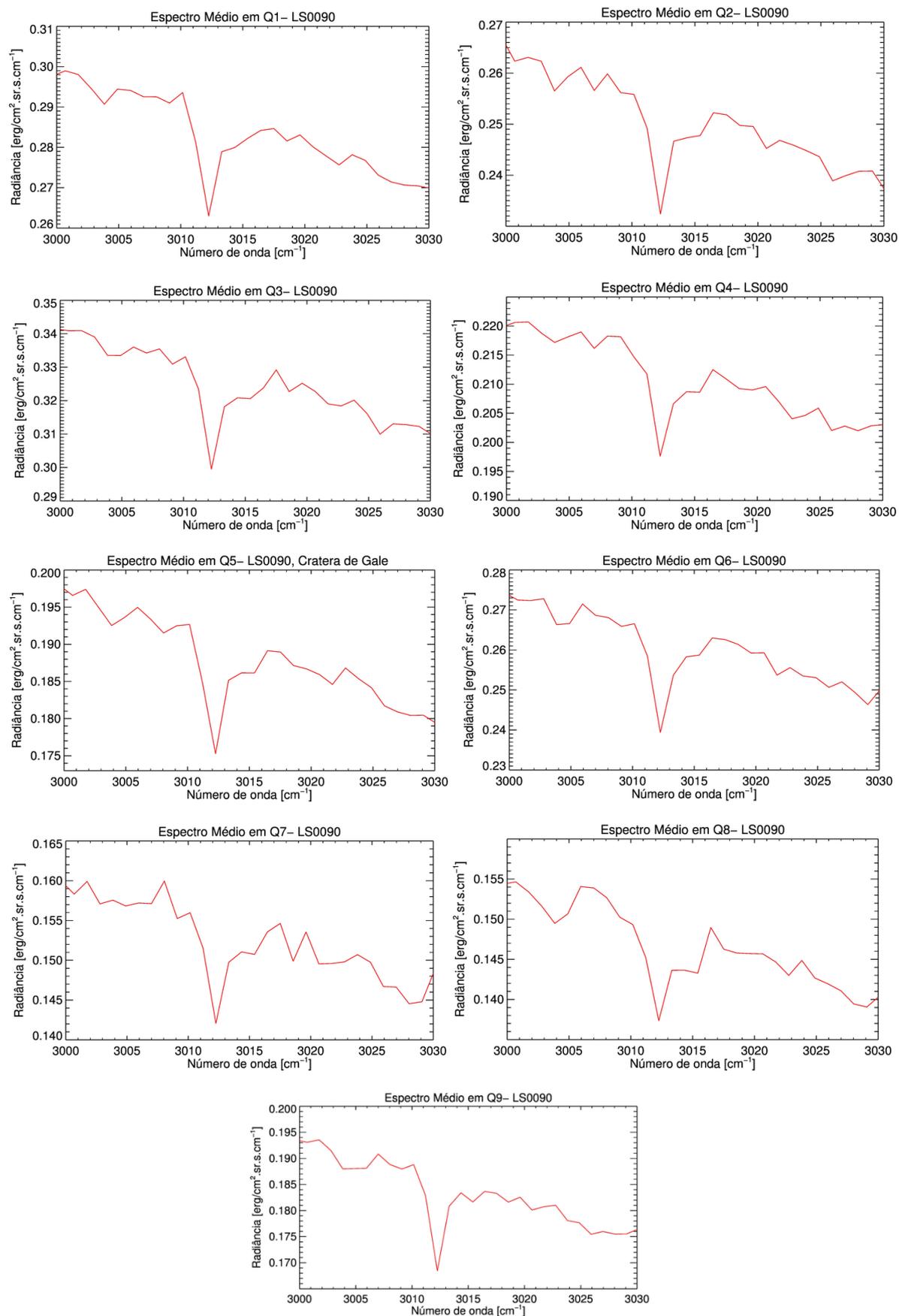
Figura 20 – Gráfico da região Q5 nos números de onda de interesse, no período de $L_s = (0, 90)$.



Fonte: Autor (2016).

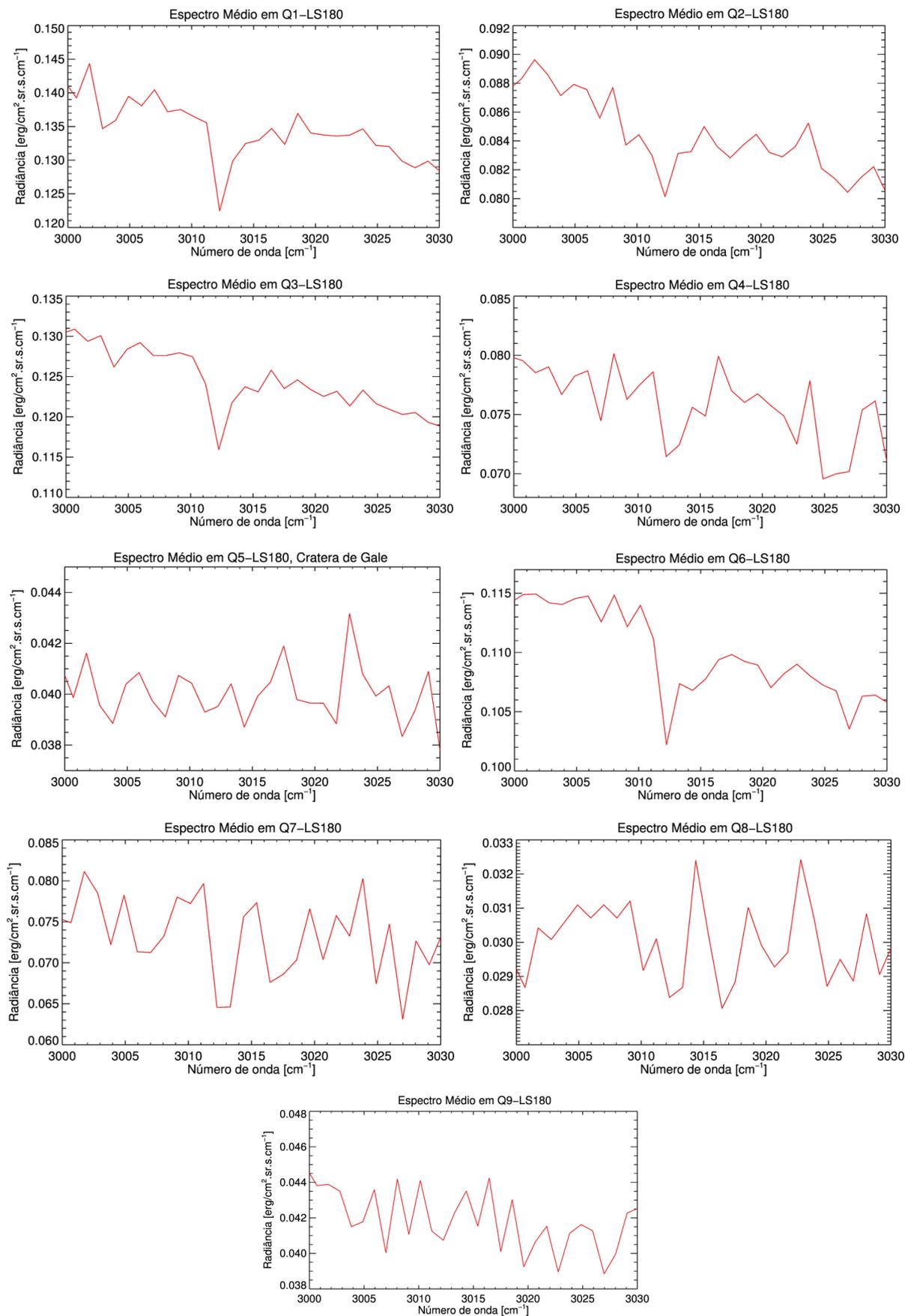
O processamento descrito anteriormente foi aplicado para todas as regiões delimitadas, em todos os quatro períodos sazonais de Marte. A figura 21 mostra os gráficos das regiões delimitadas (Q1-Q9) no período da primavera – ou seja, $L_s = (0^\circ, 90^\circ)$. A figura 22 mostra os gráficos das regiões delimitadas no período do verão – ou seja, $L_s = (90^\circ, 180^\circ)$. A figura 23 mostra os gráficos das regiões delimitadas no período de outono – ou seja, $L_s = (180^\circ, 270^\circ)$. Finalmente, a figura 24 mostra os gráficos das regiões delimitadas no período de inverno – ou seja, $L_s = (270^\circ, 360^\circ)$.

Figura 21 – Gráficos das regiões delimitadas, no período de $L_s = (0, 90)$.



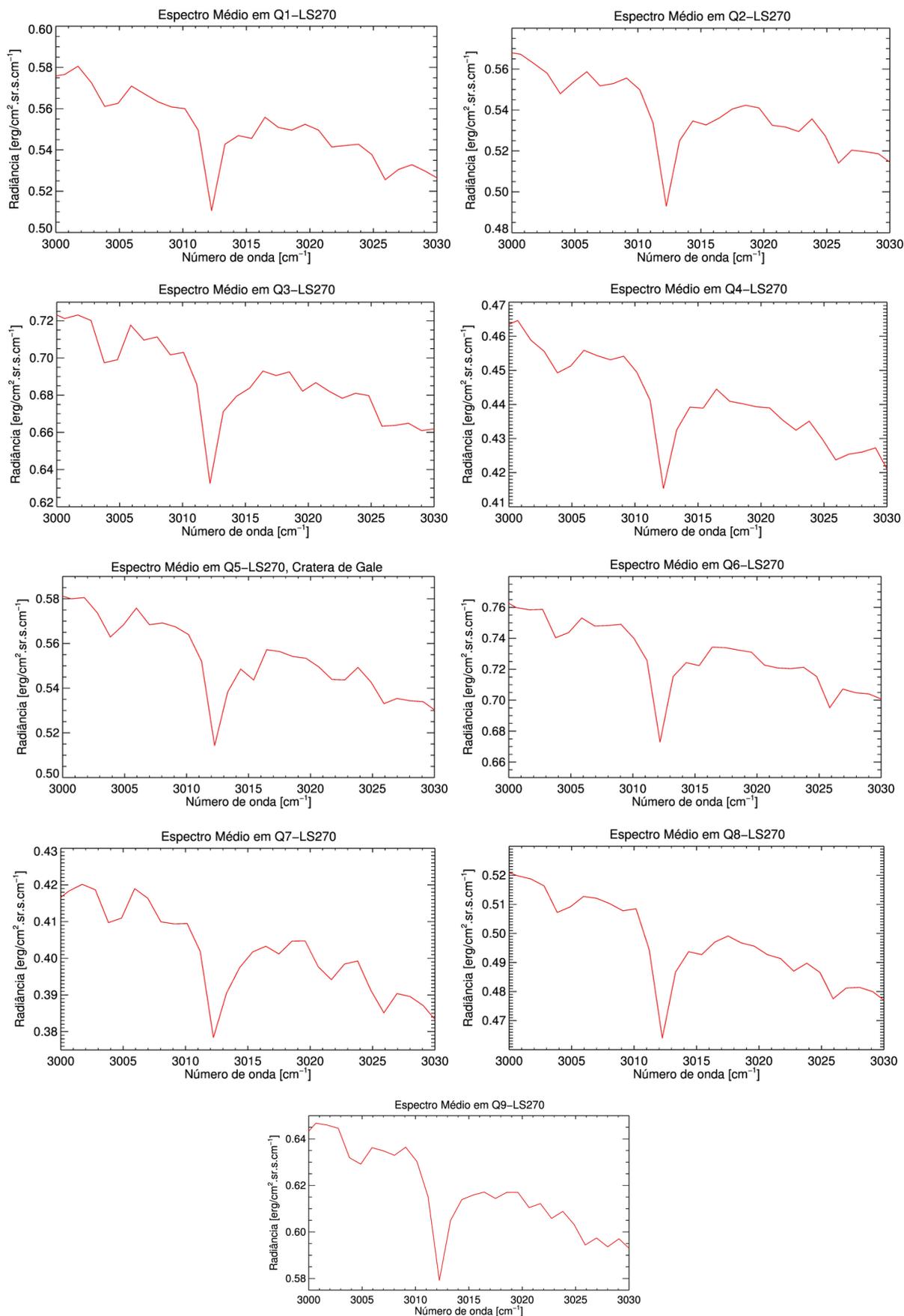
Fonte: Autor (2016).

Figura 22 – Gráficos das regiões delimitadas, no período de Ls = (90, 180).



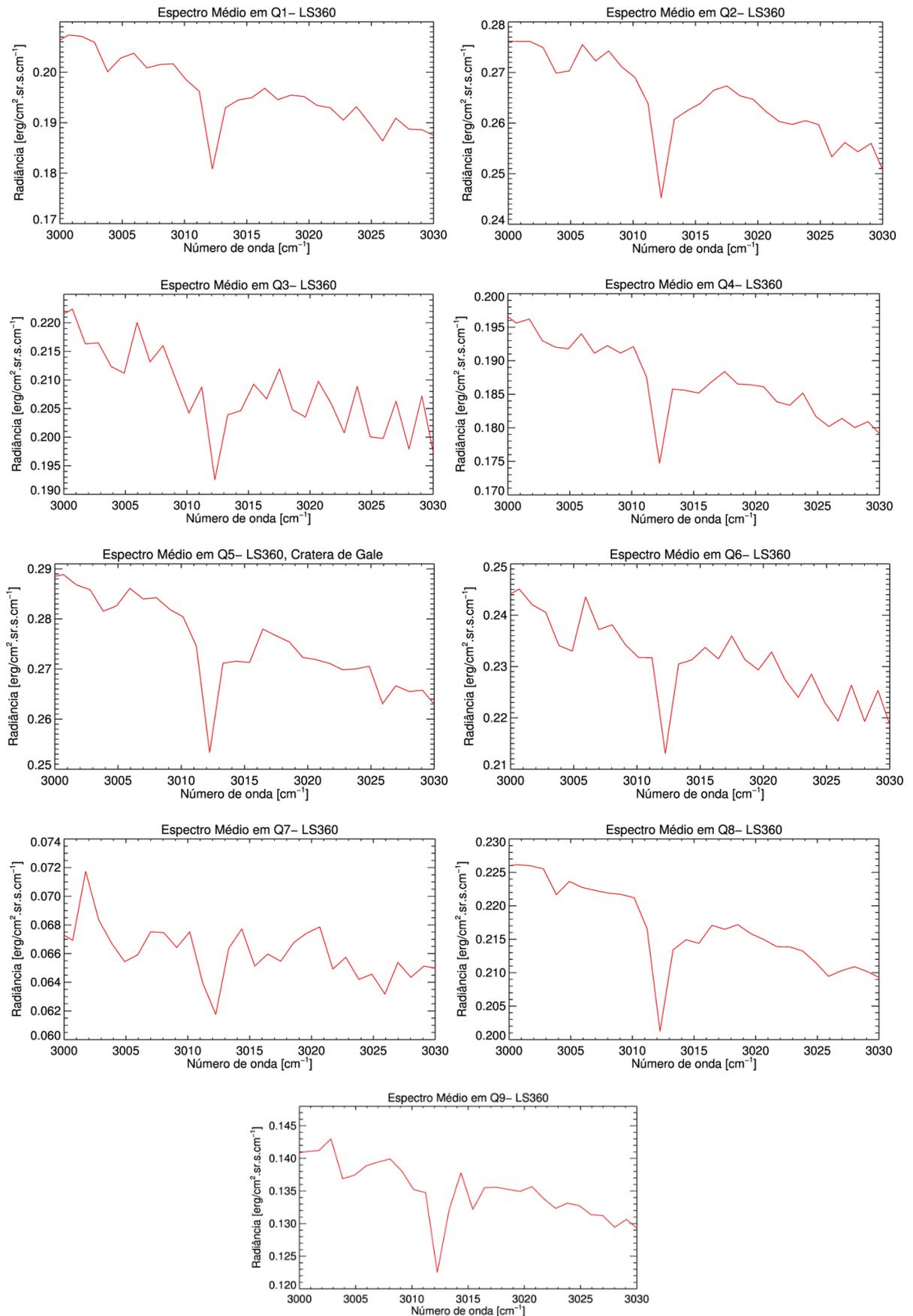
Fonte: Autor (2016).

Figura 23 – Gráficos das regiões delimitadas, no período de $L_s = (180, 270)$.



Fonte: Autor (2016).

Figura 24 – Gráficos das regiões delimitadas, no período de $L_s = (270, 360)$.



Fonte: Autor (2016).

9 ANÁLISE DOS DADOS

As análises individuais dos gráficos gerados foram subdivididas pelas estações do ano nas quais estes se encontram. Em geral, análises qualitativas foram aplicadas para decidir quais espectros podem apresentar indicativos da presença de metano em sua composição. Os fatores levados em consideração para esta seleção se baseiam **no valor da SNR** (e conseqüentemente no número dos espectros somados, os valores da radiância e NER observados – que aqui será chamado de NER_{calc}), **a tendência** de comportamento clássica dos espectros somados (como um todo) e do metano, na região de interesse (conforme discutido na seção 7.1.1) juntamente com uma **linha de tendência** estipulada para identificar a profundidade da provável absorção (ou a ausência dela), e finalmente, na **SNR** que a possível linha de absorção do **metano** apresenta em relação ao NER_{calc} do espectro somado.

Tipicamente, escolhe-se um valor de corte para a SNR dos espectros próximo ao 200 para o estudo do metano, pois a linha de absorção do composto nos espectros do PFS está na ordem de 1% da radiância observada (Geminale et al., 2011). Isso significa que um espectro médio com SNR de 200, pode evidenciar uma linha de absorção com no mínimo 2 vezes o valor do NER_{calc} . Já o valor de corte escolhido para a SNR dos espectros gerados deste projeto foi de 180, levando em conta a imprecisão da escolha da radiância média, que pode alterar a SNR das medidas em até 23.

É possível observar uma tendência geral de declínio nos espectros gerados. Segundo Formisano (2004), isso é devido à possível presença de nuvens de gelo na região equatorial de Marte. Sendo assim, para a computação do SNR da linha de absorção do metano, foi utilizado uma linha estatística de ajuste de tendência linear com a melhor confiança possível (representada nos gráficos por R^2) em uma sequência de dados definida.

9.1 PRIMAVERA

As análises iniciais, mostram que todas as regiões de estudo no período da primavera ($L_s = 0, 90$) apresentam um valor de SNR que ultrapassaram o ponto de corte de 180 (eq. 6). Além disso, a tendência de comportamento dos espectros na região do 3018 cm^{-1} acaba evidenciando 4 regiões onde as linhas de absorção do metano podem ser possivelmente observadas. A tabela 4 expõe com mais detalhe, todas as informações relevantes para a análise inicial das regiões de estudo.

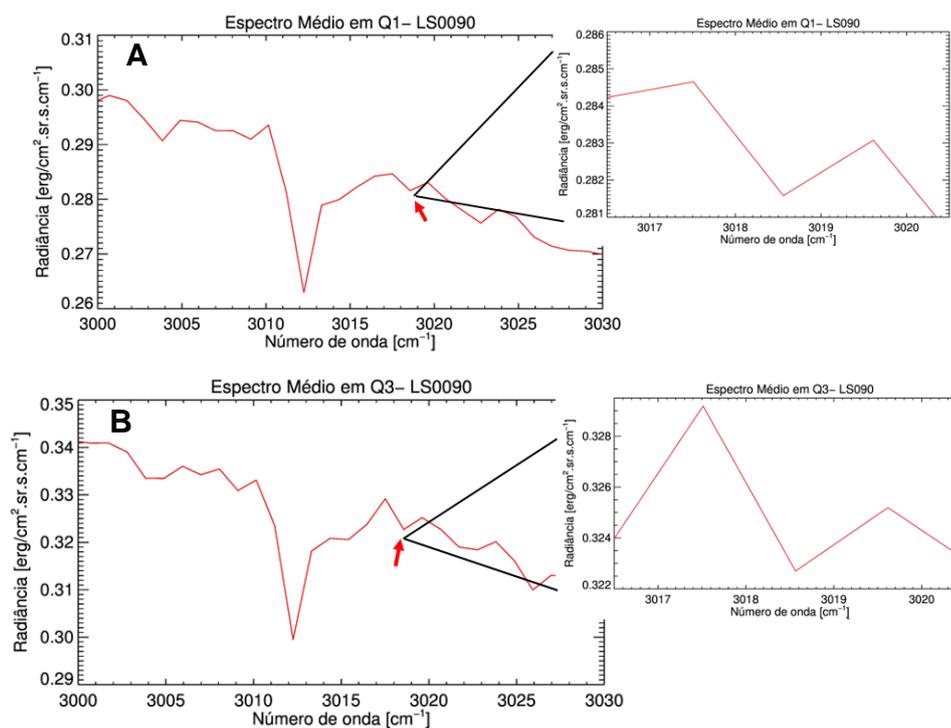
Tabela 4 – Detalhamento das informações dos espectros no período Ls (0, 90).

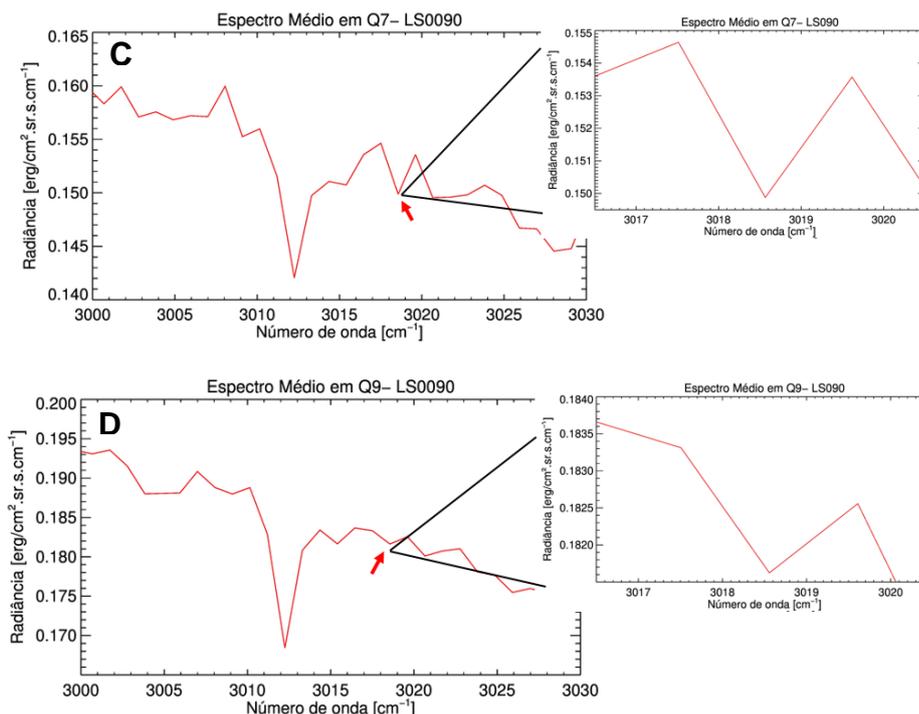
Região	Espectros somados	Intensidade do sinal	SNR	NER _{calc}	Metano detectável
Q1	285	0,28	472	0,00059	Sim
Q2	351	0,25	468	0,00053	Não
Q3	278	0,32	533	0,00060	Sim
Q4	192	0,21	291	0,00072	Não
Q5	365	0,19	363	0,00052	Não
Q6	219	0,26	384	0,00067	Não
Q7	154	0,15	186	0,00081	Sim
Q8	222	0,15	216	0,00067	Não
Q9	185	0,19	258	0,00073	Sim

Fonte: Autor (2016).

Nos espectros das regiões Q1, Q3, Q7 e Q9, é possível detectar a presença de uma possível linha de absorção na região $3018,5 \text{ cm}^{-1}$ (figura 25).

Figura 25 – Possível absorção de metano nos espectros Q1(A), Q2(B), Q3(C) e Q4(D).

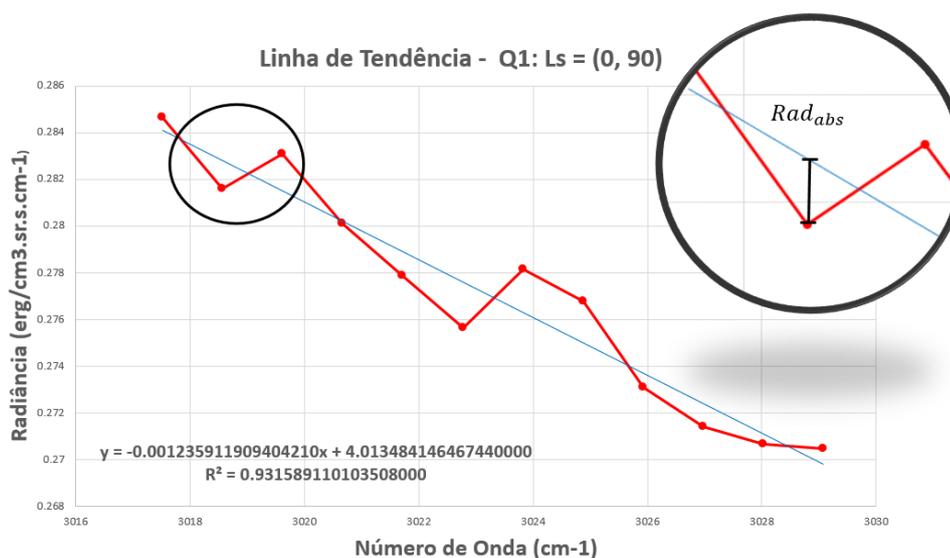




Fonte: Autor (2016).

Para sustentar a hipótese de que estas absorções na região de 3018 cm^{-1} são de fato ocasionadas pelo metano (e não por um ruído do equipamento), optou-se por realizar o cálculo da SNR especificamente do pico de absorção desta região. Para isto, foi estimado a profundidade aproximada (figura 25) das linhas de absorção das 4 regiões descritas anteriormente, utilizando uma linha que ajusta a tendência na região de interesse ($3017 \text{ cm}^{-1} - 3029 \text{ cm}^{-1}$).

Figura 25 – Linha de tendência usada para estimar a radiação absorvida ($3018,5 \text{ cm}^{-1}$).



Fonte: Autor (2016).

A partir da estimativa mostrada acima, foi possível estabelecer um valor de $0,001229 \text{ erg/s/cm}^2/\text{sr/cm}^{-1}$ para a absorção da região $3018,5\text{cm}^{-1}$ na região Q1. Este valor, possui uma confiança em relação ao ajuste de $R^2 = 0,91$. Sabendo que os espectros somados da região Q1 apresentam um NER_{calc} de $0,00059$, é possível estimar que a SNR_{met} desta absorção é de 2 (eq. 7)

$$SNR_{\text{met}} = \frac{Rad_{\text{abs}}}{NER_{\text{calc}}} = \frac{0,001229}{0,00059} = 2,08287 \cong 2 \quad (7)$$

Sendo:

SNR_{met} = Razão Sinal-Ruído da região de absorção do metano;

Rad_{abs} = Radiância estimada da profundidade da linha de absorção observada;

NER_{calc} = Radiação de Ruído Equivalente dos espectros somados da região estudada (Q1).

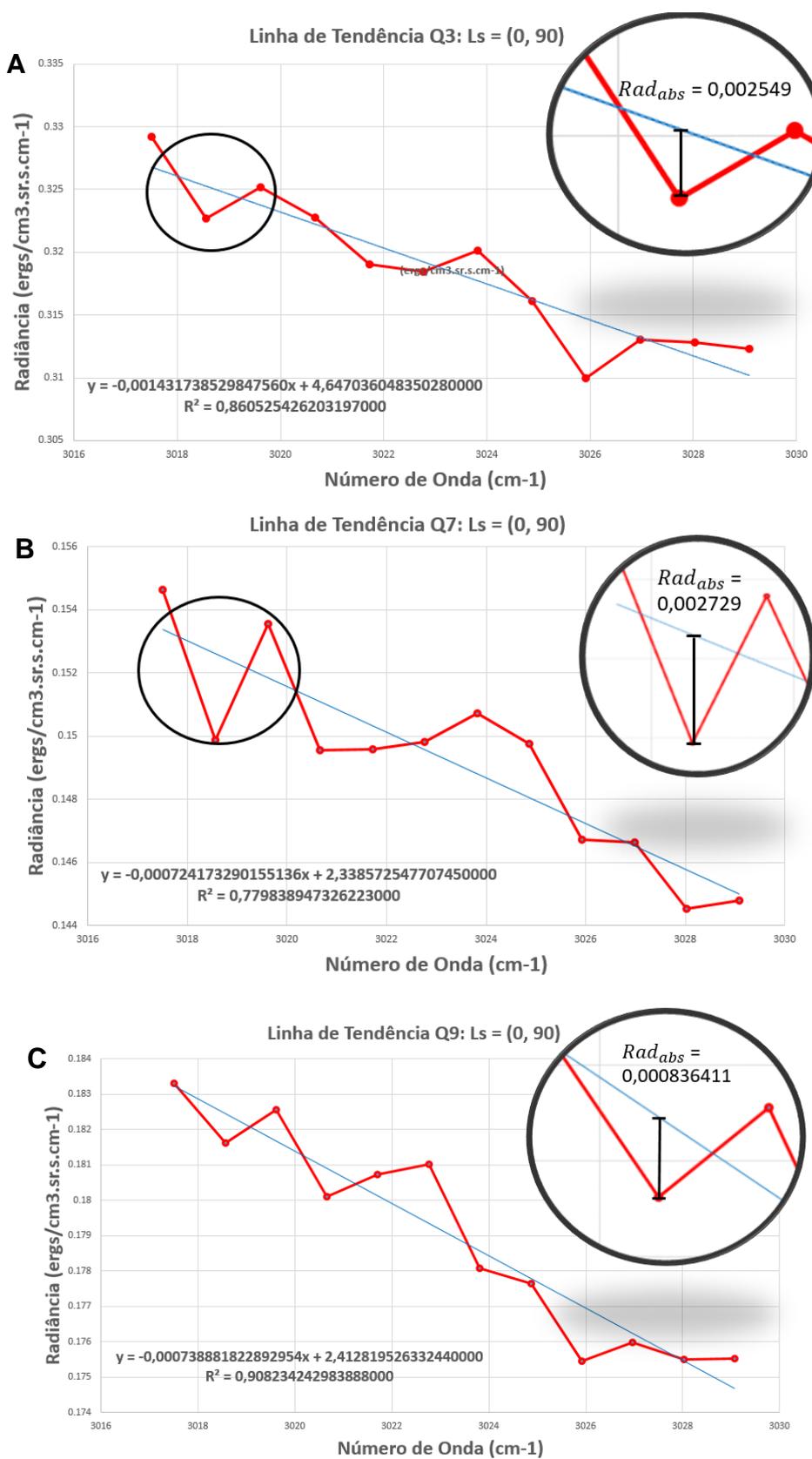
Apesar de apresentar uma SNR_{met} considerada baixa, ainda assim a provável absorção do metano na região Q1, apresenta um sinal duas vezes maior do que o NER_{calc} das medidas. Vale lembrar que a análise da linha de absorção do metano, fazendo-se uso de uma linha de tendência, resulta em um limite inferior para o SNR no espectro observado.

O mesmo procedimento descrito acima, foi aplicado para as demais regiões Q3, Q7 e Q9. A região Q3 conta com um valor de absorção da região do metano de $0,002549 \text{ erg/s/cm}^2/\text{sr/cm}^{-1}$. Levando em conta o NER_{calc} dos espectros somados de $0,00060$, foi encontrado o valor da SNR_{met} de 4 (4,248986), ou seja, um pico de absorção em uma ordem 4 vezes superior ao NER_{calc} do espectro calculado. Já a região Q7 apresenta um valor de absorção na região espectral de $3018,5\text{cm}^{-1}$ de $0,002729 \text{ erg/s/cm}^2/\text{sr/cm}^{-1}$. Dividindo este valor pelo NER_{calc} dos espectros somados (neste caso de $0,00081$) o valor da SNR_{met} para Q7 é de 3 (3,3689). Finalmente, a região Q9 apresenta um valor de absorção da região do metano de $0,000836411 \text{ erg/s/cm}^2/\text{sr/cm}^{-1}$. Sabendo que o valor do NER_{calc} dos espectros somados é de $0,00073$, o valor da SNR_{met} para a região Q9 é de apenas 1 (1,145769). Sendo assim, para a região Q9, não é possível distinguir a possível absorção do espectro, do erro interno do equipamento.

Simplificando, as regiões Q1, Q3 e Q7 apresentam diversas evidências (tanto comportamental, quanto qualitativas) que as linhas de absorção do metano muito provavelmente se fazem presente, neste período sazonal.

A figura 26 mostra os ajustes realizados pelas linhas de tendência, para o cálculo do SNR_{met} na região Q3(A), Q7(B) e Q9(C).

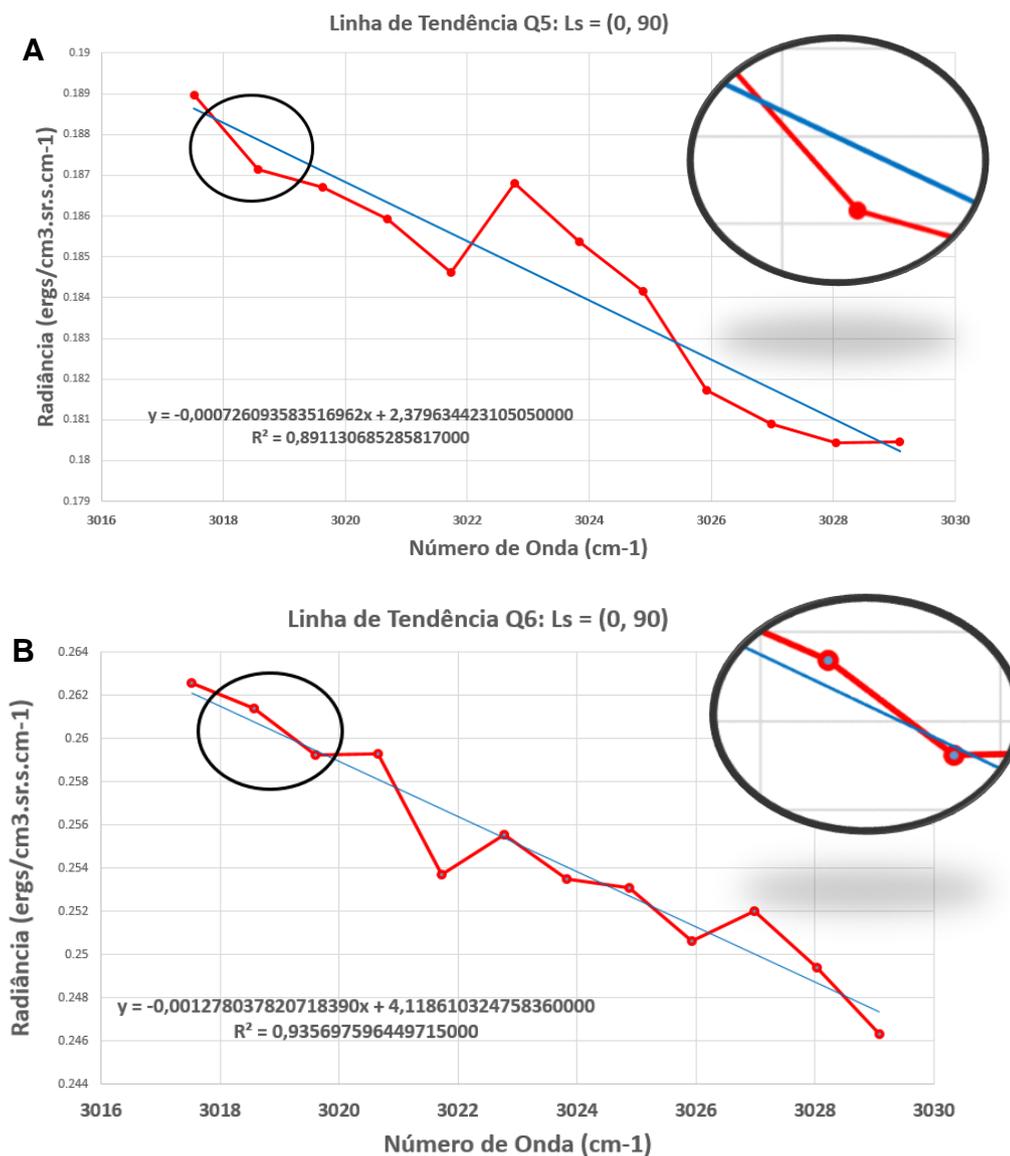
Figura 26 – Linha de tendência usada para estimar a radiação absorvida na região de $3018,5\text{cm}^{-1}$. (A) = Q3, (B) = Q7 e (C) = Q9.



Fonte: Autor (2016).

As demais regiões Q2, Q4, Q5, Q6 e Q8, não apresentam nenhum sinal de absorção na região de 3018 cm^{-1} . Para fins ilustrativos, a figura 27 mostra o comportamento da linha de tendência aplicada, na região de absorção do metano para a região Q5 e Q6.

Figura 27 – Linha de tendência aplicada na região de estudo Q5 (A) e Q6 (B).



Fonte: Autor (2016).

A partir da figura 27 nota-se que não é possível realizar nenhuma aproximação para a determinação da SNR_{met} , devido a não observação de uma linha de absorção na região de interesse. Apenas o declive natural já discutido das medidas realizadas, podem ser observados. Por esta razão, estas cinco regiões não puderam ser mais profundamente estudadas, sendo consideradas como ausente de sinais de metano.

9.2 VERÃO

As análises iniciais realizadas mostram um caso interessante para os locais de estudo no verão. Apenas uma região apresentou um SNR aceitável para realizar uma análise mais profunda em seus respectivos espectros: Q3. A tabela 5 expõe com mais detalhe, todas as informações relevantes para a análise inicial das regiões de estudo.

Tabela 5 – Detalhamento das informações dos espectros no período Ls (90, 180).

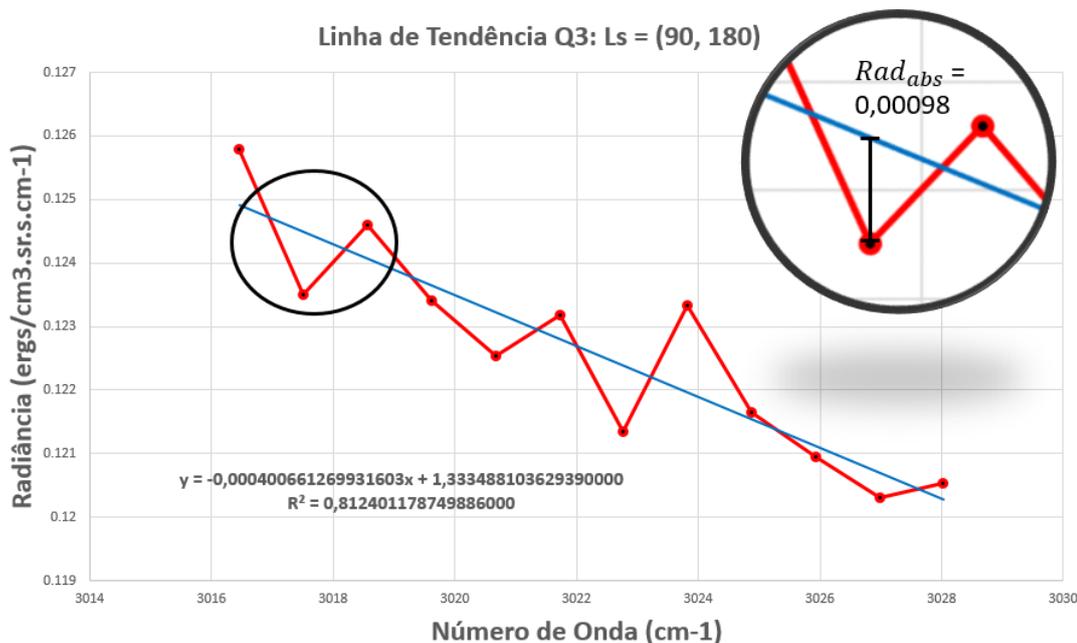
Região	Espectros somados	Intensidade do sinal	SNR	NER_{calc}	Metano detectável
Q1	102	0,135	136	0,00099	N/A
Q2	174	0,086	113	0,00076	N/A
Q3	271	0,125	205	0,00061	Sim(?)
Q4	57	0,080	60	0,00132	N/A
Q5	162	0,040	50	0,00078	N/A
Q6	180	0,108	144	0,00074	N/A
Q7	23	0,074	35	0,00208	N/A
Q8	125	0,030	33	0,00089	N/A
Q9	84	0,042	38	0,00109	N/A

Fonte: Autor (2016).

Observando a tabela acima, nota-se nitidamente que as regiões de estudo obtiveram uma intensidade de sinal (radiância observada) média muito abaixo do normal. Isso acaba influenciando significativamente na SNR dos espectros gerados. Uma discussão mais aprofundada sobre os possíveis atenuantes deste sinal está apresentada na seção 10 deste projeto.

Com relação à região de estudo Q3, a figura 28 mostra a linha de ajuste de tendência das medições selecionadas. Primeiramente, nota-se que na região de 3018 cm^{-1} , não se observa nenhuma tendência de absorção. Existe de fato um possível comportamento de absorção – mas na região de $3017,5 \text{ cm}^{-1}$, o que já é um indicativo de que a análise pode contar com muito ruído associado, devido à baixa radiância observada. Identificando a profundidade da possível absorção apresentada ($0,00098 \text{ erg/s/cm}^2/\text{sr/cm}^{-1}$), o valor da SNR_{met} para a região Q3 é de apenas 1 (1,606), o que corrobora com a hipótese de que este sinal de “absorção” é apenas um falso sinal gerado pelo alto grau de ruído nesta específica região espectral.

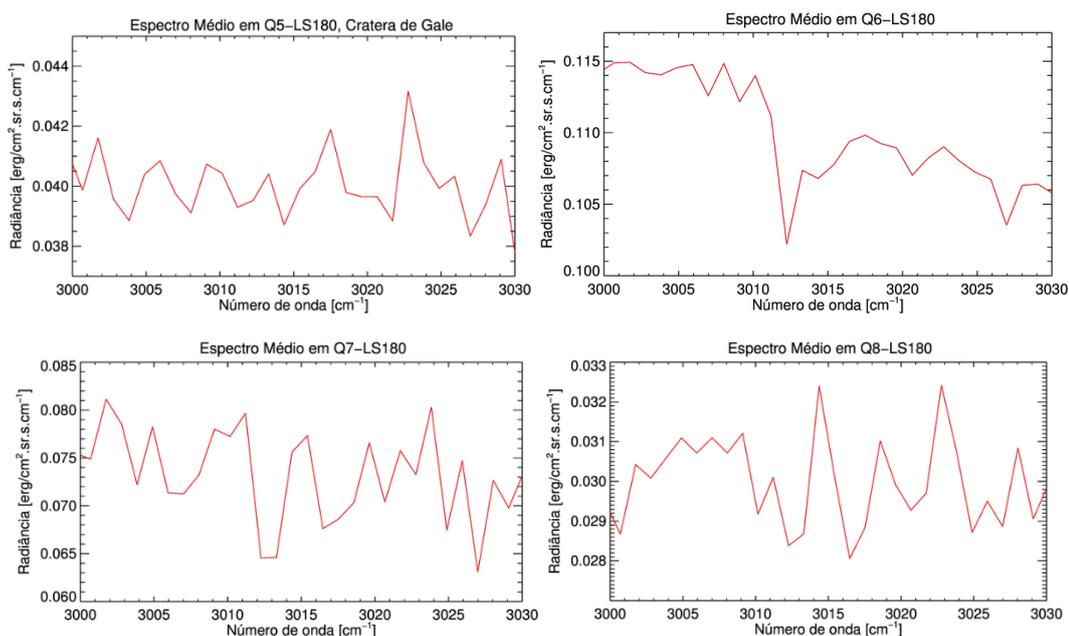
Figura 28 – Linha de tendência aplicada nos pontos seleccionados da região Q3.



Fonte: Autor (2016).

Em relação às demais regiões, os baixos valores de SNR apresentados refletem-se drasticamente no comportamento dos espectros gerados. A figura 29 evidencia este comportamento “aleatório”, no qual sugere que há um grande valor de ruído associado às medidas destas regiões.

Figura 29 – Espectros médios de quatro regiões distintas (Q5, Q6, Q7 e Q8), que apresentam os valores de SNR baixo, para o período do verão.



Fonte: Autor (2016).

9.3 OUTONO

As análises iniciais, mostram que todas as regiões de estudo no período do outono ($L_s = 180, 270$) apresentam um valor de SNR que ultrapassaram o ponto de corte de 180. Além disso, a tendência de comportamento dos espectros na região do 3018 cm^{-1} acabam evidenciando 3 regiões onde as linhas de absorção do metano podem ser possivelmente observadas. A tabela 4 expõe com mais detalhe, todas as informações relevantes para a análise inicial das regiões de estudo.

Tabela 6 – Detalhamento das informações dos espectros no período L_s (180, 270).

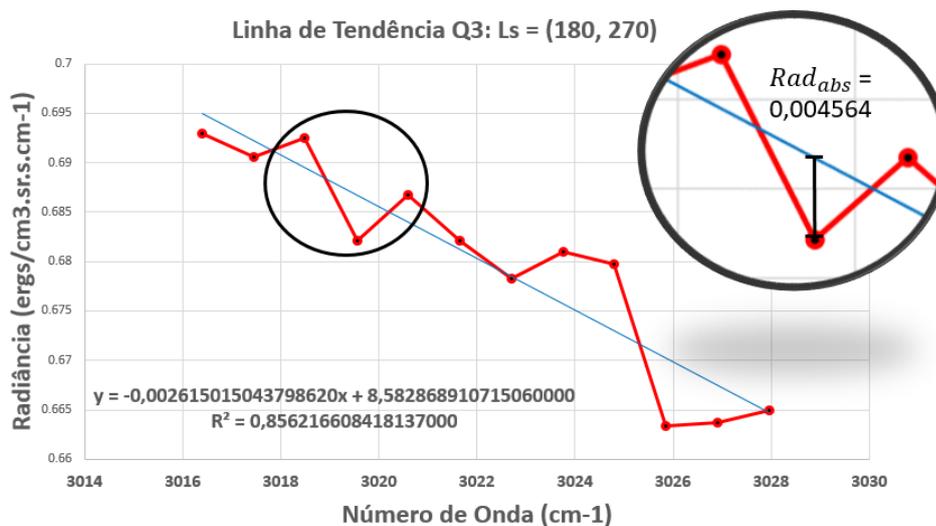
Região	Espectros somados	Intensidade do sinal	SNR	NER_{calc}	Metano detectável
Q1	142	0,55	655	0,00084	Não
Q2	228	0,54	815	0,00066	Não
Q3	88	0,69	647	0,00106	Sim
Q4	163	0,44	561	0,00078	Não
Q5	212	0,55	800	0,00068	Não
Q6	135	0,73	848	0,00086	Não
Q7	175	0,40	529	0,00075	Sim(?)
Q8	260	0,50	806	0,00062	Não
Q9	68	0,61	503	0,00121	Sim

Fonte: Autor (2016).

Nos espectros das regiões Q3, Q7 e Q9, é possível detectar a presença de uma possível linha de absorção na região de interesse.

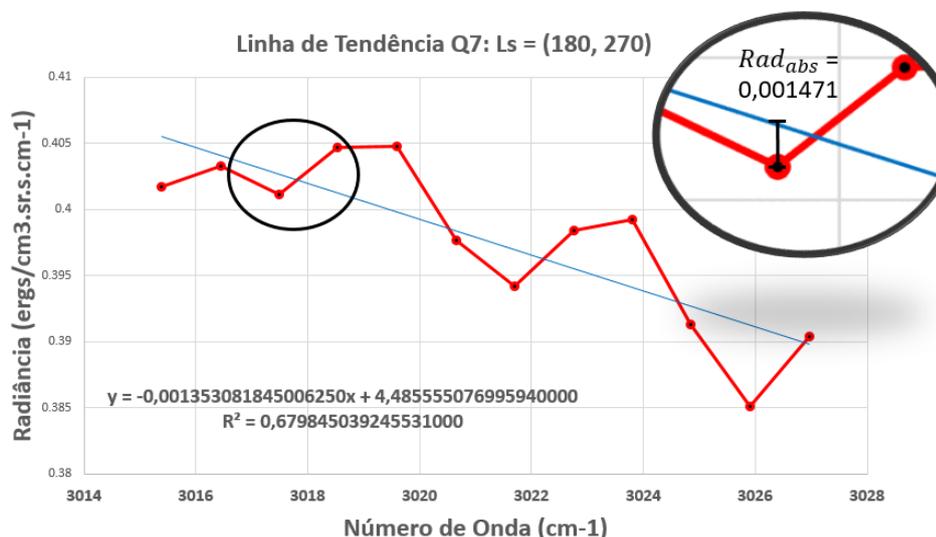
Primeiramente, analisando a região Q3 com um maior detalhe, é observado que o pico de absorção evidenciado no espectro está na região de 3019 cm^{-1} . Porém a região Q3, apesar de apresentar uma SNR alta (647), possui apenas 88 espectros somados, o que pode ter ocasionado um pequeno “*shift*”, devido a variação do ponto observado nas medidas. Para saber se essa absorção foi ocasionada por um ruído do equipamento, foi calculado o SNR_{met} de acordo com a linha de tendência mostrada na figura 30. Com um ajuste de confiança em relação à linha de $R^2 = 0,85$, foi estimado que o valor da Rad_{abs} é de $0,004564 \text{ erg/s/cm}^2/\text{sr/cm}^{-1}$, e conseqüentemente, a SNR_{met} é de 4 (4,305882).

Figura 30 – Linha de tendência aplicada nos pontos seleccionados da região Q3.



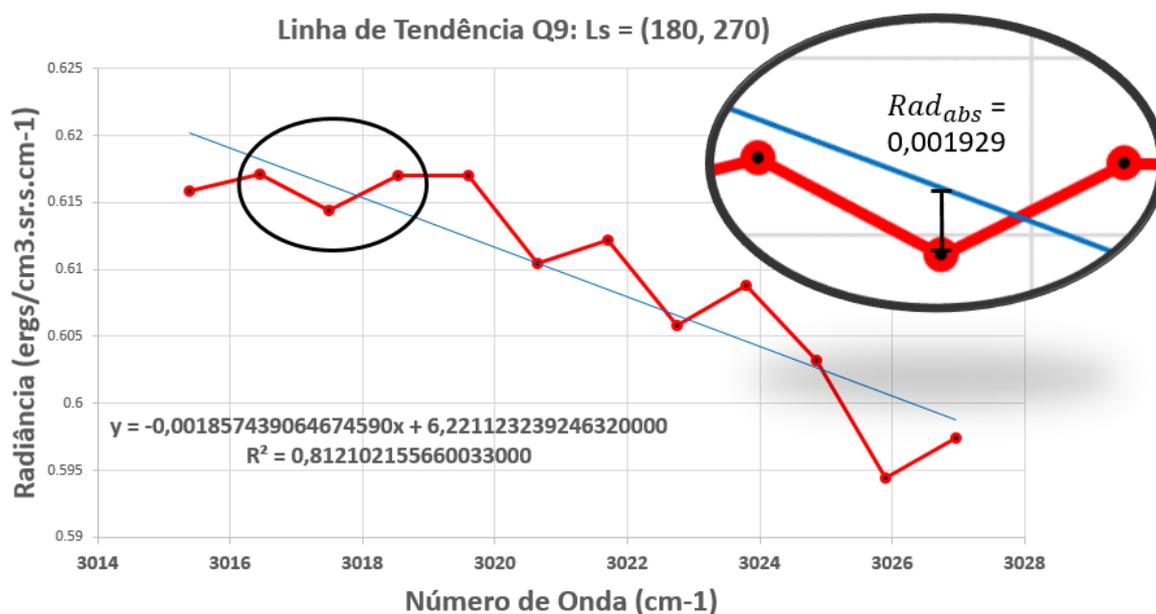
Já na região Q7, a análise realizada mostra que houve também um deslocamento da possível linha de absorção do metano (dessa vez para a esquerda, em $3017,5 \text{ cm}^{-1}$). Para identificar a possibilidade desta absorção ser ocasionada por um ruído do equipamento, foi calculada a SNR_{met} com base na diferença entre o valor do pico de absorção, e a linha de tendência gerada (figura 31). Obtendo o valor de $Rad_{\text{abs}} = 0,001471 \text{ erg/s/cm}^2/\text{sr/cm}^{-1}$, o valor da SNR_{met} encontrada foi de 2 (1,961521), ou seja, o valor de absorção observado no espectro apresenta no mínimo 2 vezes o valor do NER_{calc} , o que não descarta a possibilidade desta ser ocasionada pelo metano presente na região.

Figura 31 – Linha de tendência aplicada nos pontos seleccionados da região Q7.



Na região Q9, também é possível observar um valor de absorção um pouco deslocado da região de 3018 cm^{-1} ($3017,5 \text{ cm}^{-1}$). Apesar da região apresentar o menor número de espectros somados (ou seja, a menor quantidade de medições feitas para esta estação), esta apresenta uma SNR alta (503) devido aos fortes valores de radiância, neste período sazonal. A figura 32 mostra a linha de tendência ajustada para os valores correspondentes, mostrando uma variação entre a absorção da região de interesse e a linha de ajuste de $Rad_{abs} = 0,001929 \text{ erg/s/cm}^2/\text{sr/cm}^{-1}$. A partir disso, foi determinado que o valor da SNR_{met} para este pico de absorção é de 1 (1,59), o que acaba mostrando que nesta região de interesse, o valor da absorção está muito próximo do ruído tradicional do equipamento ($NER_{calc} = 0,00121$).

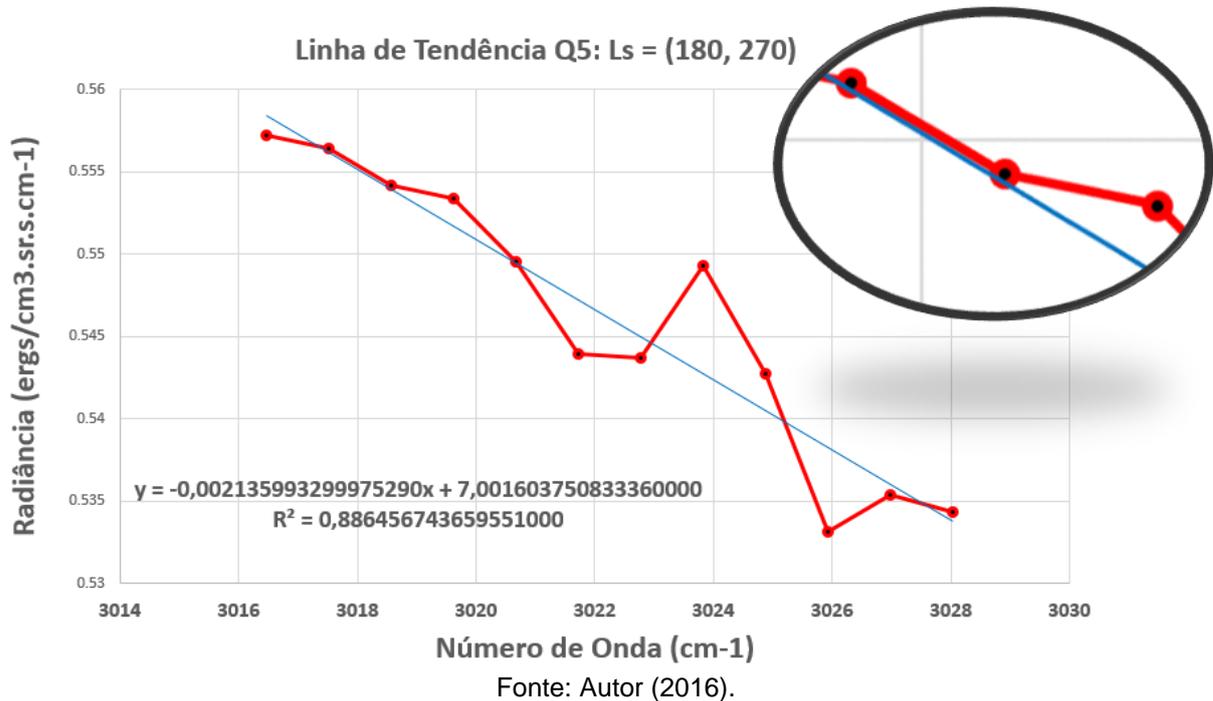
Figura 32 – Linha de tendência aplicada nos pontos selecionados da região Q9.



Simplificando, as regiões Q3, Q7 apresentam algumas evidências (comportamentais e qualitativas) que corroboram para a possibilidade de que estas linhas de absorção nas regiões de interesse, venham a ser provenientes do metano, neste período sazonal. Já a região Q9, não obteve um valor de SNR_{met} convincente.

As demais regiões (Q1, Q2, Q4, Q5, Q6 e Q8) não apresentam nenhum sinal de absorção na região de interesse que se possa levar em conta para estimar seus respectivos SNR_{met} . A figura 33 demonstra graficamente a ausência de uma linha absorção, na seção de interesse da região Q5, na qual aplica-se para as demais regiões citadas.

Figura 33 – Linha de tendência aplicada nos pontos selecionados da região Q5.



9.4 INVERNO

As análises iniciais, mostram que 8 das 10 regiões de estudo no período do inverno (Ls = 270, 360) apresentam um valor de SNR que ultrapassaram o ponto de corte de 180. Coincidentemente, as duas regiões com baixo SNR (Q7 e Q9) apresentam medidas somente no período de inverno de um ano marciano anterior. Isto é devido ao fato de que a missão EXT2, compreende uma duração de mais de um ano marciano, ocasionando o agrupamento de medidas realizadas em anos distintos. Para as demais regiões, os valores referentes a órbitas de anos interiores foram eliminados.

Seguindo em frente, observando a tendência de comportamento dos espectros das regiões selecionadas na região do 3018 cm⁻¹, acabam evidenciando 2 destas regiões (Q1 e Q8), onde as linhas de absorção do metano podem ser possivelmente observadas. A tabela 4 expõe com mais detalhe, todas as informações relevantes para a análise inicial das regiões de estudo.

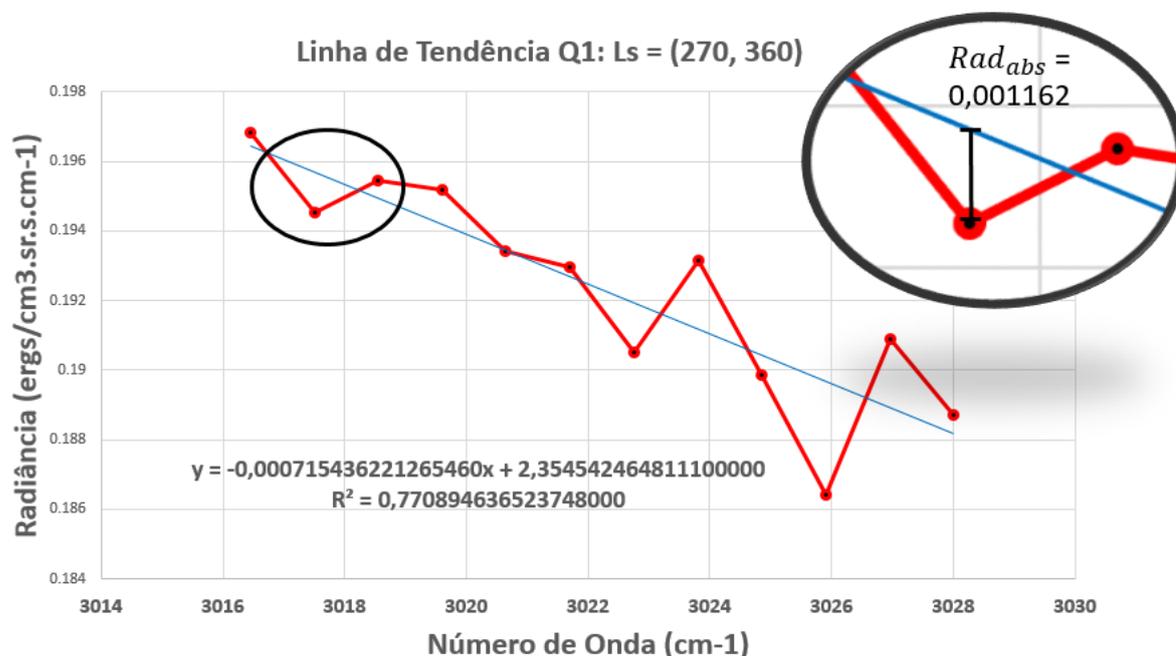
Tabela 6 – Detalhamento das informações dos espectros no período Ls (270, 360).

Região	Espectros somados	Intensidade do sinal	SNR	NER _{calc}	Metano detectável
Q1	379	0,195	379	0,00051	Sim
Q2	332	0,266	484	0,00054	Não
Q3	316	0,208	369	0,00056	Não
Q4	443	0,188	395	0,00047	Não
Q5	376	0,278	539	0,00051	Não
Q6	337	0,235	431	0,00054	Não
Q7	74*	0,066	56	0,00116	N/A
Q8	512	0,217	491	0,00044	Sim
Q9	174*	0,135	177	0,00075	Não

Fonte: Autor (2016).

Na região Q1, é possível identificar uma absorção próxima à região 3018 cm⁻¹. Encontrando o valor da Rad_{abs} (0,001162 erg/s/cm²/sr/cm⁻¹) a partir da linha de tendência aplicada, foi possível encontrar o valor de 2 para a SNR_{met} (2,27778).

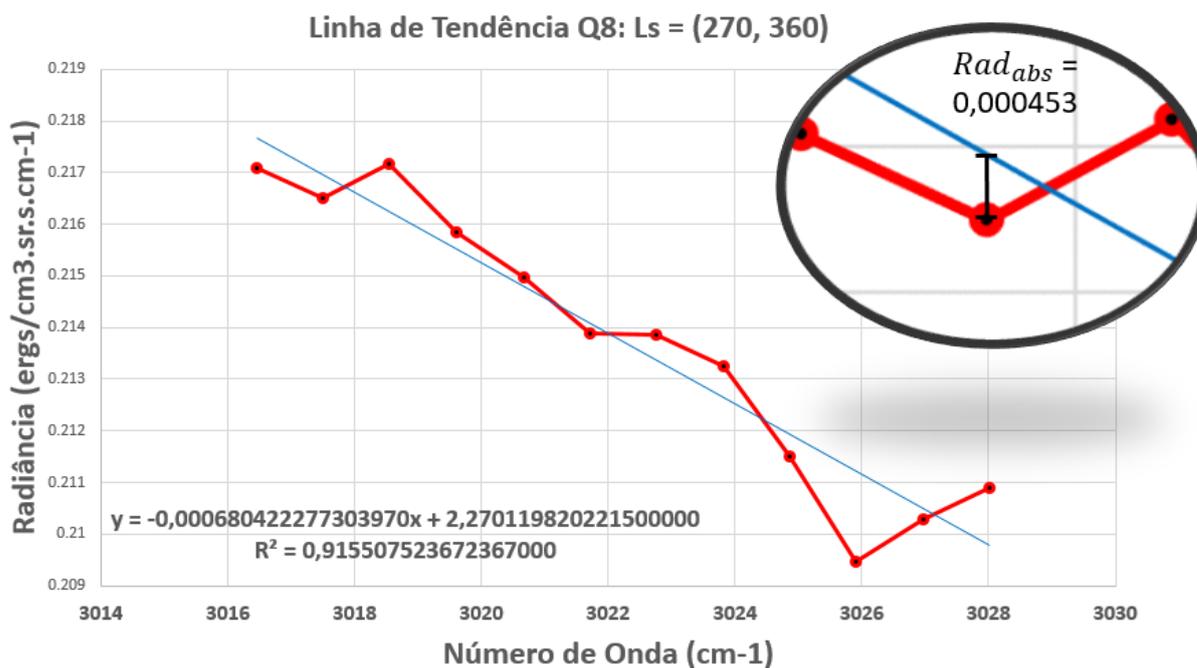
Figura 34 – Linha de tendência aplicada nos pontos selecionados da região Q1.



Fonte: Autor (2016).

Na região Q8, também é possível identificar uma absorção próxima à região 3018 cm^{-1} . Sabendo que, a partir da linha de tendência ajustada no espectro, a região delimitada (figura 35) apresenta um valor $\text{Rad}_{\text{abs}} = 0,000453 \text{ erg/s/cm}^2/\text{sr/cm}^{-1}$. Com isso, o valor para a SNR_{met} encontrada foi de apenas 1 (1,028633). Isso significa que a absorção encontrada apresenta uma grande chance de ser apenas uma resposta do ruído do equipamento.

Figura 35 – Linha de tendência aplicada nos pontos selecionados da região Q8.



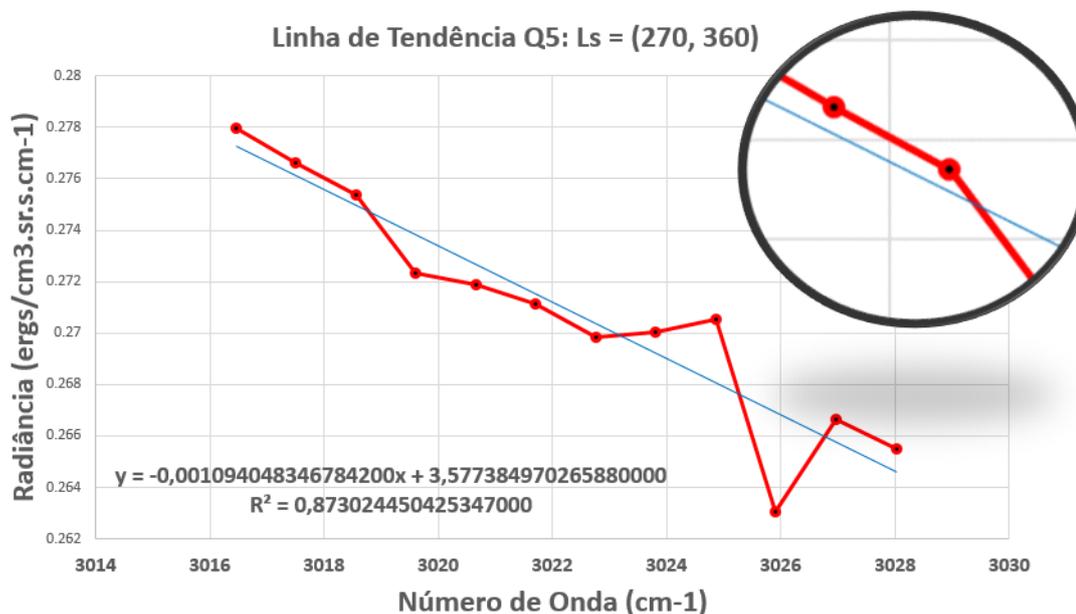
Fonte: Autor (2016).

Resumindo, apenas a região Q1 apresenta evidências de que a absorção observada possa ser devido à presença de metano.

As demais regiões (Q2, Q4, Q5, Q6, Q7 e Q9) não apresentam nenhum sinal de absorção na região de interesse de seus espectros. A figura 36 demonstra graficamente a ausência de uma linha absorção, na seção de interesse da região Q5, a qual aplica-se para as demais regiões citadas.

A região Q3, apesar de apresentar uma boa SNR, foi descartada de análise devido ao seu comportamento espectral incomum. É possível observar diversos picos de emissão e absorção em regiões onde não se tem associação com nenhum tipo de matéria em específico. Isto pode ser reflexo de uma possível tempestade de areia localizada, a qual “contamina” o espectro devido aos grãos de poeira lançados para a atmosfera.

Figura 36 – Linha de tendência aplicada nos pontos seleccionados da região Q5.



Fonte: Autor (2016).

10 DISCUSSÃO

De acordo com as análises apresentadas na seção anterior, observa-se que as melhores épocas para se realizar estudos mais profundos em busca do metano nas regiões delimitadas são nos equinócios – ou seja, na primavera e outono. Estes são os períodos que apresentam a maior intensidade de luz solar (ou seja, radiação) sobre as regiões próximas à linha do equador (localização da Cratera de Gale). Isso justifica o fato de que nestes períodos, observa-se uma radiação consideravelmente maior nas regiões de estudo do projeto, quando comparada às observadas nos períodos de solstício (verão e inverno).

A tabela 7 resume as regiões onde as análises realizadas foram capazes de indicar uma possível assinatura do metano na atmosfera.

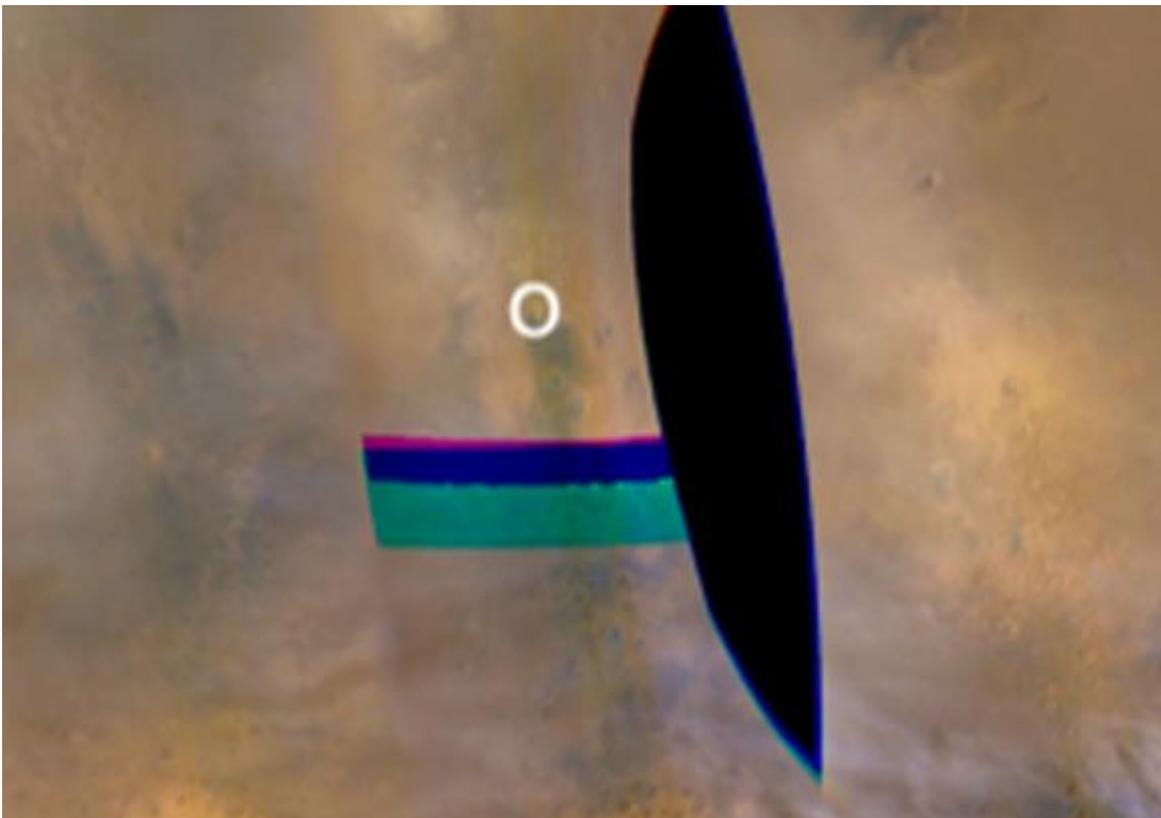
Tabela 7 – Regiões com possível indicação de metano, em cada período sazonal.

Período sazonal	Região com indicação de metano	SNR _{met} (respectivamente)
Primavera	Q1, Q3, Q7	2, 4, 3
Verão	N/A	N/A
Outono	Q3, Q7	4, 2
Inverno	Q1	2

Fonte: Autor (2016).

Os espectros médios gerados no período do verão, são particularmente interessantes, pois os valores de radiância observados são muito inferiores quando comparados aos demais espectros. Por exemplo, no período da primavera, os espectros gerados apresentam uma radiância média em torno de $0,22 \text{ erg/s/cm}^2/\text{sr/cm}^{-1}$, enquanto que no período do verão, os espectros gerados mostram uma radiância média de $0,08 \text{ erg/s/cm}^2/\text{sr/cm}^{-1}$ – um sinal quase 3 vezes menor. Existem diversas explicações para que ocorra esta atenuação, sendo a mais aceita, o fato de que em Marte, a frequência de tempestades de areia de escala regional ou global, é alta. De fato, em outubro de 2008 a NASA relatou uma quantidade incomum de poeira na atmosfera de Marte (figura 37), na época, a futura região de pouso do rover *Curiosity*. Sendo coincidente com o período de verão (mais precisamente Ls 128) em que a missão EXT2 realizou suas observações.

Figura 37 – Fotografia retirada pelo *Mars Reconnaissance Orbiter* da futura região de pouso da rover *Curiosity* (em branco), mostrando quantidades de poeira maiores do que o normal.



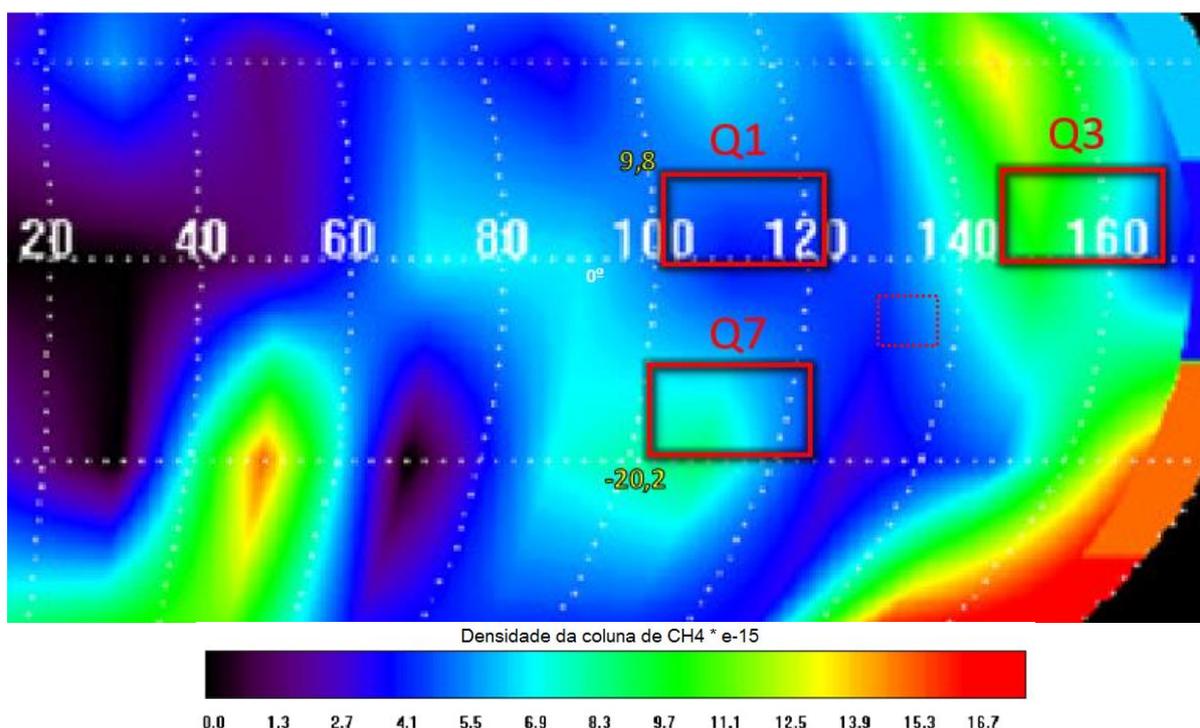
Fonte: Modificado de NASA/JPL-Caltech/MSS (2008).

Segundo Formisiano et al., (2004), a detecção de grandes quantidades de partículas de areia na atmosfera de Marte, acabam interferindo principalmente no canal SW do PFS – ou seja, diretamente nos dados analisados por este projeto. Esta afirmação, seguida das informações sobre a presença de tempestades regionais no período do verão nas áreas de estudo deste projeto, leva a crer que estas tempestades possam ser o motivo das atenuações de radiância observadas nos espectros gerados deste período sazonal.

Para fins comparativos, foram selecionadas as regiões de estudo com sinais da possível presença de metano no período da **primavera**, e correlacionadas com a análise feita por Geminale et al, em 2011, no mesmo período sazonal, porém com os dados referentes às primeiras missões do PFS (2004). A escolha da primavera se justifica simplesmente pelo fato de possuir a maior quantidade de regiões onde o metano possivelmente se evidencia, nas análises deste projeto.

Vale ressaltar que as análises realizadas em 2011, contam com uma resolução da superfície de Marte de $20^\circ \times 20^\circ$, ao passo que as análises realizadas por este projeto contam com uma resolução de superfície de $10^\circ \times 20^\circ$. A figura 38 mostra a comparação dos resultados obtidos no período de primavera ($L_s = 0, 90$).

Figura 38 – Comparação entre os resultados obtidos por Geminale et al, (2011) e as regiões que apresentaram uma possível absorção do metano, neste projeto.



Fonte: Modificado de Geminale et al. (2011).

Analisando a figura 38, é possível perceber um bom ajuste entre os valores encontrados por Geminal et al., e as regiões onde o metano possivelmente se evidencia nas análises deste projeto. Estes lugares, especialmente a região Q3 e Q7 (que aparecem novamente nas análises feitas no período de outono, do projeto), podem vir a indicar uma possível região-fonte de metano na superfície. Um estudo mais aprofundado e completo é necessário para obter uma ideia melhor sobre estas regiões.

11 TRABALHOS FUTUROS

Apesar do nível de complexidade, o autor futuramente pretende realizar a confecção de um espectro sintético, para assim efetuar uma análise não só qualitativa, mas também quantitativa dos espectros gerados. Assim, é possível obter um nível de confiabilidade das análises capazes de inferir com muito mais veemência, a presença e a quantidade de metano nas regiões de estudo delimitadas.

Também pretende-se comparar os espectros gerados neste projeto, com novos espectros gerados pelo investigador principal do PFS, Marco Giuranna – pertencente ao *Instituto Nazionale di Astrofisica*, o qual se deu à disposição para analisar os resultados aqui descritos, e recriar os gráficos das regiões delimitadas utilizando um novo método para calcular a média dos espectros, buscando evidenciar (ao invés de suavizar) com mais clareza as linhas do metano. Por fim, pretende-se escrever um artigo sobre as análises aqui descritas (juntamente com àquelas a serem feitas), com o intuito de não só alavancar o nome da instituição nesta nova área de Geociências Planetárias, mas também de ser o ponto de ignição para que o LaGEA – Laboratório de Geociências Espaciais e Astrofísica, da UNIPAMPA campus Caçapava do Sul saia finalmente do papel, possibilitando a inserção de outros acadêmicos neste ramo pouco explorado por aqui.

12 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise espectral para a busca do metano é de fato, uma tarefa bastante complexa e trabalhosa. Pela simples constatação de que altas concentrações de metano apresentam um tempo muito curto na atmosfera (de dias até meses para o metano se dissipar) é necessário ter bastante “sorte” para ser capaz de observá-lo em regiões específicas do planeta. Infelizmente devido à falta de um espectro sintético, não é possível realizar nenhuma estimativa com convicção. Porém os resultados, em sua maioria, apresentam um bom embasamento teórico e físico, o que aumentam em muito as possibilidades de acerto destas análises.

Em relação ao equipamento utilizado, é perceptível sua limitação quanto à precisão espacial para a identificação de compostos presentes em pequenas quantidades. Isso é ocasionado pelo fato do PFS necessitar de uma quantidade grande de medidas para que se possa identificar as marcas espectrais dos traçadores, resultando em uma grande variação espacial a fim de alcançar uma SNR aceitável.

Em relação aos espectros somados, foi possível observar uma suavização dos mesmos, devido às limitações da rotina de processamento desenvolvida, e a falta de informações importantes para que se pudesse evidenciar com mais clareza as regiões espectrais de interesse para o projeto.

Em relações às estações do ano, pode-se observar que para estes dados há uma melhor qualidade de sinal medido (na primavera e outono), devido à localização em que as regiões de estudo foram selecionadas (próximo ao equador).

Em relação às análises realizadas, vale ressaltar que todas foram estimando um valor **mínimo** para a radiância de absorção. Isso afeta diretamente o SNR_{met} calculado. Todos os resultados obtidos mostram apenas a **possibilidade** de haver metano nas regiões estudadas. É bom ressaltar que, a ausência da observação da possível absorção do metano não significa que o composto não está presente na região, mas sim que é impossível (com o conjunto de dados trabalhados) detectá-lo nas circunstâncias propostas.

Por fim, em relação à cratera de gale, infelizmente não foi possível observar nenhum comportamento que possa sugerir a presença de metano no local. Mais uma vez, isso não indica a ausência do composto, mas somente a falta de dados suficientes, que acabam prejudicando a precisão e a resolução do equipamento, nesta região específica do planeta.

REFERÊNCIAS

American Association for the Advancement of Science. **Hydrogen-Based Microbial Ecosystems in the Earth**. Science Magazine, v. 272, n. 5263 p. 896, mai. 1996.

BERTAUX, Jean-Loup et al. **SPICAM**: studying the global structure and composition of the Martian atmosphere. Mars Express: the scientific payload. ESA Publications Division, 2004.

California Institute of Technology. **Infrared Processing and Analysis Center**: Infrared Spectroscopy. Pasadena, 2003.

CHRISTENSEN, Philip R. et al. **Morphology and Composition of the Surface of Mars**: Mars Odyssey THEMIS Results. Science Magazine. v. 300, n. 5628, p. 2056-2061, jun. 2003.

DRISSEN, Laurent et al. **Imaging Fourier Transform Spectroscopy for Astronomy**. Université Laval, Quebec, Canadá, 201?.

ENCRENAZ, Thérèse. **Search for Methane on Mars**: Observations, Interpretation and future work. Elsevier, v. 42, n. 1, p. 1-5, jul. 2008.

European Space Agency. **Instrument Design**: Spectroscopy for Investigation of Characteristics of the Atmosphere of Mars. Europa, 2004.

European Space Agency. **Mars Express Confirms Methane in the Martian Atmosphere**. Europa, 2004.

FEDOROVA, Anna et al. **Mars Water vapor Abundance from SPICAM IR Spectrometer**: Seasonal and Geographic Distributions. Journal of Geophysical Research. v. 111, n. 9, set. 2006.

FORMISIANO, Vittorio et al. **PFS**: A Fourier Spectrometer for the study of Martian Atmosphere. Elsevier, v. 19, n. 8, p. 1277-1280, dez, 1997.

FORMISIANO, Vittorio et al. **Detection of Methane in the Atmosphere of Mars**. Science Magazine, v. 306, n. 5702, p. 1758-1761, dez. 2004.

FORMISIANO, Vittorio et al. **Support Online Material**. Detection of Methane in the Atmosphere of Mars. Science Magazine, v. 306, n. 5702, p. 1758-1761, dez. 2004.

FORMISIANO, Vittorio et al. **The Planetary Fourier Spectrometer (PFS) onboard the European Mars Express Mission**. Elsevier, Planetary and Space Science, v. 53 p. 963-974, dez. 2005.

GEMINALE, Anna et al. **Mapping Methane in Martian Atmosphere with PFS-MEX Data**. Elsevier, v. 59, n. 2, p. 137-148, fev. 2011.

GROTZINGER, John et al. **Deposition, Exhumation, and Paleoclimate of an Ancient Lake Deposit, Gale Crater, Mars**. Science Magazine. v. 350, n. 6257, ago. 2015.

Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. **High-Resolution Transmission Molecular Absorption Database - HITRAN**. Harvard University and Smithsonian Institute, Estados Unidos da América, 2015.

Jet Propulsion Laboratory. **Photojournal: The MGS Wide Angle Map of Mars**. California Institute of Technology, Arizona, 2002.

Jet Propulsion Laboratory. **The Strange Attraction of Gale Crater**. Mars Science Laboratory, Arizona, 2011.

KRASNOPOLSKY, Vladimir et al. **Detection of Methane in the Martian Atmosphere: Evidences for life?**. Icarus, v. 172, p. 537-447, ago. 2004.

MARSCHNER, Steve. **Radiometry**. Cornell University, Estados Unidos da América, 2012. Laboratoire de Météorologie Dynamique. **Mars Seasons and Solar Longitude**. The Mars Climate Database Projects, França, 2010.

MCDUNN, Tamara et al. **Climatology of the Martian Middle Atmosphere**. American Astronomical Society. DPS meeting 41, 2009.

MCSWEEN, Harry Y. et al. **Elemental Composition of the Martian Crust**. Science Magazine. v. 324, n. 5928, p. 736-739, mai. 2009.

National Aeronautics and Space Administration. **Curiosity's Landing Site: Gale Crater**. Estados Unidos da América, 2012.

National Aeronautics and Space Administration. **Exploration of the Planet Mars: Mars Facts**. Estados Unidos da América, 2015.

National Aeronautics and Space Administration. **Exploration of the Planet Mars: Program & Missions**. Estados Unidos da América, 2015.

National Aeronautics and Space Administration. **Mars Global Surveyor: MOLA PEDRs**. PDS Geosciences Node, dez. 2003.

NELSON, Stephanie V. et al. **Mars Exploration Program: Expected Data Volumes and Data Access Requirements for Research and Public Engagement**. Jet Propulsion Laboratory. Pasadena, 2001.

NELSON, Richard C. et al. **Absorption Spectra of Methane in the Near Infrared**. Journal of Research of the National Bureau of Standards. v. 41, n. RP1944. p. 615-621. dez. 1948.

OLIVEIRA FILHO, Kepler de S.; SARAIVA, Maria de F.O. **Astronomia & Astrofísica**. Departamento de Astronomia – Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2ª ed. Porto Alegre: Livraria da Física, 2014.

OWEN, Tobias. **The Composition and Early History of the Atmosphere of Mars**. In: Mars, p. 818-834, 1992.

PIDWIRNY, Michael. **Atmospheric Pressure**. Fundamentals of Physical Geography, 2ª ed. University of British Columbia, 2006.

REBERAC, Aurélie. **Mars Express SPICAM: To Planetary Science Archive Interface Control Document**. Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales, 2012.

REUSCH, William. **Visible and Ultraviolet Spectroscopy**. Capacity Building in Chemical Education. Michigan State University, Estados Unidos da América, 2013.

Royal Society of Chemistry. **LearnChemistry**: Introduction to Spectroscopy. Reino Unido, 2016.

RUTTEN, Robert J. **Introduction to Solar Spectrum**. Utrecht University, Países Baixos, 2007.

SINDONI, Giuseppe. **PFS Data User Tutorial**. Mars Express and Venus Express Data Workshop. ESA/ESAC, Espanha, 2011.

TIPLER, Paul; Llewellyn, Ralph A. **Física Moderna**. 5ª ed. LTC, 2010.

United States Geological Service. **Aeolis MC-23 Map**. International Astronomical Union, Europa, 2013.

WEBSTER, Christopher et al. **Mars Methane Detection and Variability at Gale Crater**. Science Magazine, v. 347, n. 6220, p. 415-417, jan. 2015.

WILLIAMS, David R. **Mars Fact Sheet**. NASA Goddard Space Flight Center, 2004.

WOOD, Harley. **Gale, Walter Frederick (1865–1945)**. Australian Dictionary of Biography, Australian National University. Austrália, 1981.

ZUBRIN, Robert. **The Case for Colonizing Mars**. 27th Annual International Space Development Conference, Washington DC: National Space Society, 1996.