



Cassini-Huygens: A Sonda Espacial que Mudou a Compreensão Sobre Saturno e Suas Luas Geladas Titã e Encélado

CASSINI-HUYGENS: The Space Probe That Changed Saturns and Its Icy Moons Titan and Enceladus Comprehension

FERNANDO HENRIQUE MARTINS¹, JOSÉ LEONARDO FERREIRA²

¹Instituto de Ciência Tecnologia e Inovação ICTI, Universidade Federal da Bahia, UFBA, 42809-000, Camaçari, Brasil

²Laboratório de Física de Plasma, Instituto de Física, Universidade de Brasília, UnB, 70910-900, Brasília, Brasil

Resumo

Neste ano, a missão Cassini-Huygens completa cinco anos desde seu desfecho quando foi lançada propositalmente para colidir contra a espessa atmosfera do nosso grandioso Senhor dos Anéis. Durante quase vinte anos, esta missão obteve surpreendentes resultados sobre o complexo sistema saturnino revelando mistérios e fenômenos obscurecidos pela enorme distância que separa este planeta da Terra. Nesse contexto, serão apresentados os principais feitos da missão Cassini enviada para investigar Saturno, seus anéis e suas luas dando ênfase aos resultados obtidos sobre as luas Titã e Encélado a partir de uma extensa revisão bibliográfica. Os equipamentos e experimentos que viajaram a bordo da espaçonave Cassini e da sonda europeia Huygens coletaram diversos dados e revelaram correntes de jato na atmosfera de Saturno, longas tempestades que varrem o planeta de leste a oeste e auroras boreais em sua alta atmosfera. Além disso, a missão contribuiu para melhor entendimento sobre as interações que ocorrem entre Saturno, seus anéis e suas luas. Por fim, a espaçonave Cassini revelou que a lua gelada Encélado apresenta atividade geológica como criovulcanismo e Titã possui lagos, rios e oceanos de hidrocarbonetos que sofrem transformações semelhantes àquelas que a água sofre aqui na Terra.

Palavras-chave: Sonda Espacial Cassini-Huygen. Saturno. Titã. Encélado.

Abstract

This year, the Cassini-Huygens mission completes five years since its demise when it was purposely launched to crash into the thick atmosphere of our great Lord of the Rings. For almost twenty years, this mission has obtained surprising results on the complex Saturn system, revealing mysteries and obscured phenomena due to the enormous distance that separates this planet from

Earth. In this context, the main achievements of the Cassini mission sent to investigate Saturn, its rings and moons will be presented, emphasizing the results obtained on the moons Titan and Enceladus from an extensive literature review. The equipment and experiments that traveled aboard the Cassini spacecraft and the European probe Huygens collected data and revealed jet streams in Saturn's atmosphere, long storms that sweep the planet from east to west, and aurora borealis phenomena occurring on its upper atmosphere. In addition, the mission contributed to a better understanding of the interactions that exist between Saturn, its rings and its moons. Finally, the Cassini spacecraft revealed that the icy moon Enceladus presents geological activity such as cryovolcanism and Titan has lakes, rivers and oceans of hydrocarbons that undergo transformations similar to those that water undergoes here on Earth.

Keywords: Cassini-Huygens Spacecraft. Saturn. Titan. Enceladus.

I. INTRODUÇÃO

Quando se observa o planeta Saturno e algumas de suas luas através de um telescópio, não se imagina que este sistema seja dinâmico e apresente alguma atividade. Contudo, ao se fazer uma reflexão sobre o próprio movimento da Lua em torno da Terra, pode-se especular sobre alguma atividade no sistema de Saturno e, assim, se questionar quais mecanismos que poderiam ocorrer neste mundo tão distante de nós. Embora Saturno esteja a aproximadamente a uma distância de 9 UA (cerca de 1277 milhões de km) da Terra, essa escala de distância nada se compara à vastidão do Universo e explorar este sistema começa a se tornar um sonho possível. Este planeta peculiar é bastante interessante pelo fato de possuir anéis e luas tão grandes que se não estivessem próximas de Saturno, seriam elas mesmas outros planetas do Sistema Solar. Os anéis e algumas das maiores luas deste planeta são visíveis quando observados por um telescópio newtoniano comum mesmo a distâncias imensas, mas isso não é suficiente. Queremos chegar mais perto!

O sistema de Saturno pode ser considerado um “mini” Sistema Solar (Johnson, 2009). Neste sistema, o próprio planeta faz o papel do Sol com sua intensa gravidade e campo magnético interagindo com seus anéis e seus satélites que, por sua vez, performartizam os planetas do Sistema Solar. Este arranjo não só expõe as complexas interações envolvidas na formação do Sistema Solar mas também mostra a riqueza fenomenológica de nosso Sistema Solar atual.

Sendo Saturno um planeta gasoso, ele compartilha algumas propriedades que Júpiter também possui tais como o intenso campo magnético (Hubbard et al. 2009) em torno do planeta que é resultado do movimento de íons de hidrogênio localizados em seu interior, tempestades violentas varrem as superfícies de ambos os planetas bem como a presença de diversas luas, algumas delas inclusive com características planetárias que despertam bastante interesse na comunidade científica.

Outro ponto em comum entre os dois planetas é que, devido à intensa força gravitacional, no início da formação do Sistema Solar, eles lançaram cometas e asteroides por todo sistema e provavelmente alguns deles devem ter colidido com a Terra, preenchendo o planeta com água já que os cometas são constituídos de gelo e poeira (Kepler, 2017 e Carrol, 2017). Hoje

em dia, Saturno e os planetas gasosos desempenham papel fundamental para a proteção da Terra contra eventuais colisões com cometas e asteroides, pois, esses planetas atraem para si esses corpos e os mantém aprisionados no cinturão de asteroides que se localiza na região entre os planetas Marte e Júpiter. É importante também mencionar que vários destes cometas, apesar de estarem gravitacionalmente presos ao Sol, têm suas orbitas perturbadas e são capturados por estes grandes planetas. Desta forma, se tornam cometas periódicos realizando orbitas elípticas de grande excentricidade, como é o caso do famoso cometa Halley.

Saturno impressiona pelo fato de apresentar anéis visíveis, algo que os outros planetas gasosos do nosso Sistema Solar não compartilham. Entretanto, todos os gigantes gasosos apresentam anéis difusos que somente podem ser detectados com instrumentos sensíveis em comprimentos de onda no infravermelho e no ultravioleta. Os anéis de Saturno foram provavelmente formados quando uma lua grande se aproximou muito de Saturno ao ponto deste planeta destroça-las em pedaços devido à intensa interação gravitacional com o planeta.

Tanto Saturno quanto Júpiter estão localizados em regiões do Sistema Solar além da zona habitável, que é definida como sendo a região na qual a temperatura permite que a água seja encontrada em seu estado líquido. Desta forma, suas luas são lugares extremamente gelados. Outra característica dos satélites naturais é o fato de que eles não possuem atmosfera, assim como a nossa Lua. Entretanto, o que se descobriu com as sondas espaciais Voyager é que a maior lua de Saturno, Titã, possui uma intensa atmosfera composta principalmente por nitrogênio, metano e outros hidrocarbonetos e esconde sua superfície contendo rochas congeladas e imensos lagos de metano (Coustenis et al. 2009), o que configura algo extremamente incomum para um satélite natural. Além disso, descobriu-se que a lua Encélado possui uma superfície relativamente nova pelo fato de apresentar poucas crateras de impacto o que despertou ainda mais a curiosidade dos cientistas que se questionaram se ocorre algum mecanismo geológico de renovação da superfície (Vesbicer, 2007). Há algo acontecendo lá e queremos descobrir o que é!

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é explorar os principais resultados científicos obtidos pela missão Cassini-Huygens, primeira espaçonave a orbitar o sistema de Saturno durante sua muito bem-sucedida missão ao longo de 20 anos de operação investigando o sistema de Saturno. Além disso, vale a mencionar a importância de se publicar e divulgar trabalhos sobre astronomia e astrofísica em língua portuguesa uma vez que os temas de pesquisa sobre sondas exploratórias do Sistema Solar são comumente publicados em periódicos de língua inglesa o que prejudica o acesso à informação daqueles que não dominam nenhuma língua estrangeira.

O volume de dados e informações colhidos durante a missão é extremamente grande e sua longa discussão foge do escopo deste trabalho. Portanto, serão abordados alguns fenômenos atmosféricos e de física de plasma que ocorrem em Saturno e em seu ambiente interplanetário, incluindo seus anéis. Serão também investigadas emissões de rádio a partir do plasma nas auroras polares que ocorrem em Saturno, bem como o acoplamento eletromagnético que existe entre o planeta, seus anéis e suas luas. Saturno possui 83 satélites naturais, inclusive algumas dessas luas foram descobertas durante a missão Cassini. Daremos atenção às luas Titã e Encélado. Titã possui uma atmosfera muito espessa e a

sonda europeia Huygens foi desenvolvida para pousar neste ambiente e obter informações geológicas e atmosféricas durante o procedimento de descida. Encélado surpreendeu os pesquisadores devido ao fato de apresentar bastante atividade geológica e interagir fortemente com os anéis de Saturno bem como com a magnetosfera deste planeta, além de possivelmente possuir um imenso oceano de água líquida debaixo de sua superfície gelada.

II. SATURNO: O SENHOR DOS ANÉIS APÓS CASSINI

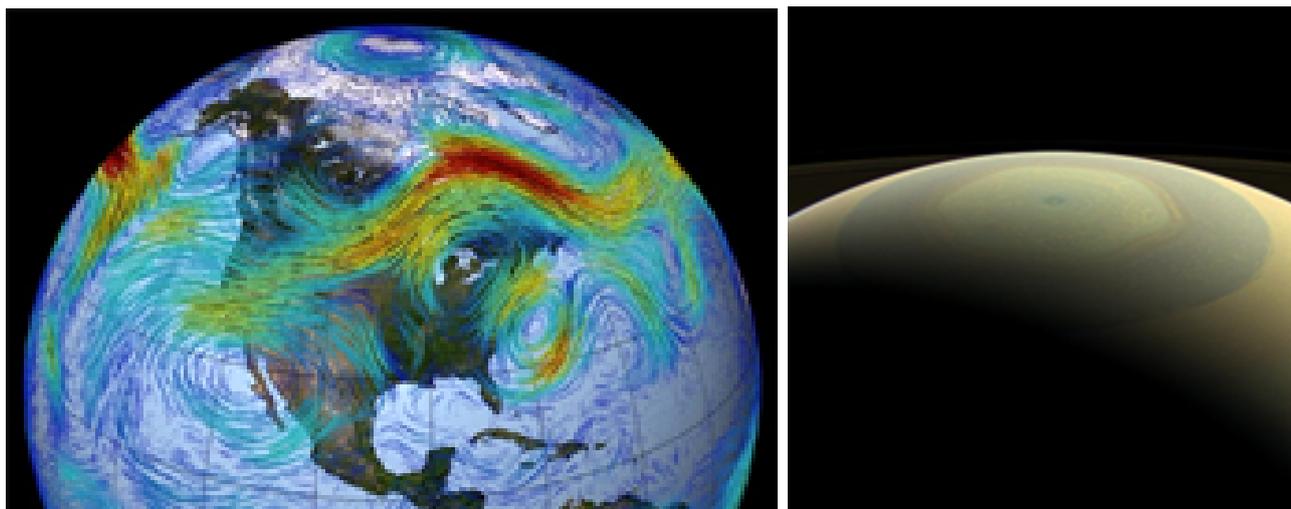
Saturno é um planeta gasoso de um sistema complexo que possui 83 satélites naturais e um conjunto de anéis visíveis e difusos. Este sistema não é complexo apenas devido ao número de luas que orbitam o planeta, mas também devido ao fato de haver bastante interação entre o planeta, seus anéis e suas luas. Suas luas geladas, Titã e Encélado, apresentam muita interação com a magnetosfera deste planeta. A primeira em virtude ao seu tamanho e proximidade ao planeta e a segunda por causa da sua constante manutenção dos anéis a partir de emissão de partículas neutras e carregadas provenientes de gêiseres localizados em seu polo sul. Portanto, o sistema saturnino é complexo por ser dinâmico e os detalhes das interações que ocorrem entre o planeta, seus anéis e suas luas serão apresentados ao longo desta seção.

II.1. Fenômenos atmosféricos em Saturno

Observações deste planeta obtidas por instrumentos localizados na Terra e em sua órbita junto com alguns sobrevoos de espaçonaves Voyagers 1 e 2 foram insuficientes para revelar os mistérios escondidos de Saturno. Entretanto, com a Cassini os cientistas foram capazes de estudar características peculiares que só poderiam ser obtidas estando presente lá, no sistema saturnino, como por exemplo como a composição e a temperatura da alta atmosfera de Saturno é alterada à medida que as estações mudavam. Outra vantagem de se ter um orbitador no sistema de Saturno era a possibilidade de observar de perto as tempestades que ocorrem na atmosfera do planeta, bem como realizar medidas *in situ* de sua magnetosfera e também detectar ondas de rádio e de plasma provenientes do planeta que não podem ser detectadas da Terra. Finalmente, Cassini nos revelou detalhes jamais alcançados sobre os anéis de Saturno, que tanto encantam quando observados por nós daqui da Terra.

A atmosfera de Saturno apresenta bastante atividade assim como a atmosfera terrestre. Entretanto, o polo norte de Saturno possui a corrente de jato mais famosa e visível do planeta, cuja forma geométrica em nada se compara às formas de correntes de jato que ocorrem aqui na Terra, Figura 1. Se trata do então chamado hexágono.

A partir de 1996, a latitude do hexágono permaneceu sobre as sombras até que em 2009 os instrumentos CIRS (sigla do inglês *Composite Infrared Spectrometer*) (Flasar *et al.* 2004) e VIMS (sigla do inglês *Visible and Infrared Mapping Spectrometer*) da Cassini puderam detectar esta estrutura peculiar de Saturno. Neste ano, emissões térmicas foram detectadas por ambos instrumentos mencionados. Mapas de temperatura da troposfera superior do planeta revelaram que o hexágono é mais quente na banda a 79°N e frio na banda a 76°N sugerindo que o hexágono fosse um jato de corrente exceto pelo seu formato (Fletcher, *et al.* 2008). Termografias obtidas pelo VIMS em 5 m revelam que, neste comprimento de



(a) Mapeamento das correntes de jato no hemisfério norte do planeta Terra (b) Imagem no visível da corrente de jato no polo norte de Saturno chamado de Hexágono.

Figura 1: Fonte: NASA (sigla do inglês *National Aeronautics and Space Administration*) e JPL (sigla do inglês *Jet Propulsion Laboratory*) PIA17175.

onda, o hexágono é claramente visível, o que sugere que ele seja formado por nuvens de partículas grandes (Baines *et al.* 2009a). Essa corrente de jato em forma de hexágono, pôde ser explicada a partir da combinação de várias correntes de jato que se combinam para formar o padrão hexagonal como aquele que se estabelece no polo norte de Saturno (Aguiar *et al.* 2010).

Detecções realizadas pelo instrumento VIMS em 2006 e 2008 mostram que o hexágono está estacionário em relação ao sistema de referência da Voyager (Baines *et al.* 2009a) e que as nuvens de tempestade que se localizam dentro do hexágono se deslocam com velocidades típicas da ordem de 125 m/s enquanto que os fluxos exteriores apresentam velocidades da ordem de 30 m/s. Desde sua detecção pela Voyager 2 até a data das medidas realizadas pelo VIMS mostram que a forma do hexágono aparentemente mudou muito pouco, exceto devido à alteração de cor (Baines *et al.* 2009b).

Saturno tem a peculiaridade de apresentar enormes tempestades que são chamadas de grandes manchas brancas (sigla do inglês *Great White Spot* – GWS). Na Figura 2 é possível ver uma GWS circulando o planeta e encontrando com seu próprio rastro durante o equinócio do planeta quando os dois hemisférios estavam igualmente iluminados pelo Sol e os anéis se encontravam na posição *edge-on*. A imagem em cores reais foi obtida pelo ISS (sigla do inglês *Imaging Science Subsystem*) (Porco *et al.* 2004) da Cassini em 2011 que observou a formação da mancha durante um período de 12 semanas entre a formação da tempestade e seu encontro com o rastro deixado por ela. É possível perceber na imagem que algumas nuvens se deslocaram para o sul e se juntaram com uma corrente que se move para o leste. Esta é uma das maiores e mais intensas tempestades observadas pelas espaçonaves Voyager e Cassini em Saturno e ela ainda está ativa hoje em dia (Del Genio *et al.* 2009). Essas tempestades são periódicas e ocorrem a cada 20-30 anos e oscilam entre equador do planeta e latitudes médias (Li e Ingersoll, 2015).

Foram detectadas descargas elétricas que ocorriam dentro das tempestades observadas



Figura 2: Imagem em cores reais de uma GWS obtida pelo ISS da Cassini em 2011. Fonte: NASA/JPL PIA12826.

em Saturno (chamadas de Descargas Eletrostáticas de Saturno – SED) associadas a explosões de emissão de rádio de alta frequência. Existe consenso na comunidade científica de que as SED ocorrem devido à existência de relâmpagos. Entretanto, apesar de todas tentativas, flashes de relâmpagos visíveis não foram observados em Saturno como foram em Júpiter (Dyudina *et al.* 2007). Isto acontece provavelmente pelo fato de que as tempestades que ocorrem em Saturno são originadas em níveis mais profundos da atmosfera de Saturno do que em Júpiter e, desta maneira, sofrem extinção pelas camadas de nuvens superiores e são então obscurecidos à medida que avançam atmosfera acima.

Outro fenômeno atmosférico que ocorre tanto na Terra quanto em Saturno é a emissão de auroras polares. Este fenômeno que ocorre na alta atmosfera pôde ser investigado pelos instrumentos UVIS (sigla do inglês *Ultraviolet Imaging Spectrograph*) (Esposito *et al.* 2000), VIMS e ISS que integraram a sonda Cassini e que foram sensíveis a emissões desde o ultravioleta até comprimentos de onda no rádio (Esposito *et al.* 2004 e Kurth *et al.* 2009). Embora não estejam diretamente relacionadas a emissões de auroras, ondas de rádio quilométricas a partir de distribuição de partículas nas linhas de campo das auroras podem ser utilizadas como indicadores de atividade de auroras e, portanto, podem ser detectadas utilizando o equipamento RPWS (sigla do inglês *Radio and Plasma Wave Science*) da Cassini (Gurnett *et al.* 2004).

As primeiras imagens no ultravioleta obtidas por Cassini foram investigadas por Esposito *et al.* (2004) que descobriram que os espectros das auroras saturninas são semelhantes às que ocorrem em Júpiter e ocorrem devido à excitação de hidrogênio molecular e de hidrogênio atômico a partir de impactos eletrônicos. A Figura 3 mostra duas imagens em cores falsas de auroras polares obtidas pelo UVIS da Cassini. Em azul são as emissões de aurora de gás de hidrogênio excitado por bombardeamento de elétrons e em laranja temos a luz solar

refletida pelo planeta. As duas imagens foram obtidas com uma diferença de uma hora e mostram a resposta da aurora em relação ao aumento de pressão do vento solar incidente sobre Saturno, onde é possível notar mudanças no brilho da aurora oval e em seu interior.

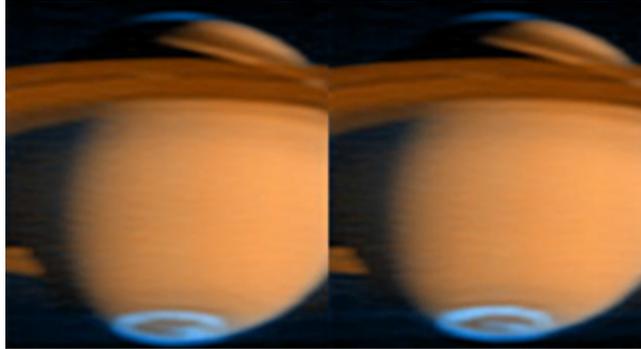


Figura 3: *Imagens em cores falsas de emissões de aurora de gás hidrogênio por bombardeamento de elétrons. Em azul são observadas as emissões em ambos os polos e em laranja temos o reflexo da luz solar sobre o planeta. Fonte: NASA/JPL PIA06436.*

Vale notar que o processo de formação de auroras é igual tanto na Terra quanto em Saturno. Variações no ambiente interplanetário que contém plasma aprisiona elétrons e outras partículas carregadas ao redor das linhas de campo magnético nas camadas atmosféricas mais externas. Esses elétrons aprisionados, por sua vez, colidem com átomos e moléculas os excitando para estados de maior energia. Em seguida, o excesso de energia é liberado na forma de radiação de cores que dependem dos átomos e moléculas excitados (Hultqvist 2007). Aqui na Terra, as excitações ocorrem em átomos de oxigênio e nitrogênio que são elementos abundantes em nossa atmosfera. Já em Saturno, as emissões são decorrentes de excitações de hidrogênio molecular e atômico presentes na alta atmosfera do planeta.

Imagens das auroras que ocorrem em Saturno também foram obtidas através do VIMS (Brown *et al.* 2004) da Cassini utilizando emissão no infravermelho (Stallard *et al.* 2008) do íon H_3^+ . A Figura 4 mostra uma imagem em cores falsas de uma aurora formada a aproximadamente 100 km do topo das nuvens no polo sul do planeta.

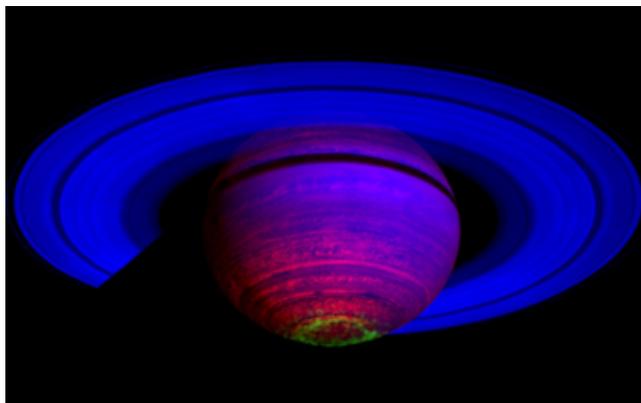


Figura 4: *Imagens em cores falsas de emissões de aurora no polo sul de Saturno obtida pelo VIMS da Cassini em 2009. Fonte: NASA/JPL PIA13402*

II.2. Magnetosfera de Saturno

As missões Pioneer e Voyagers realizaram algumas medidas da magnetosfera de Saturno quando sobrevoaram este planeta (Spilker 1997, Meltzer 2015). Contudo, foi somente após a missão Cassini que se pôde obter uma compreensão mais profunda e mais prolongada das várias seções da magnetosfera e das populações de partículas que povoam o meio interplanetário em torno do planeta anelado. Através da Cassini, foram investigadas as propriedades da magnetosfera tais como correntes elétricas, emissões de rádio, ondas de plasma e interações com os anéis e satélites do planeta.

Os processos dinâmicos que ocorrem na magnetosfera de um planeta são extremamente complexos, como por exemplo, o surgimento de correntes de anel. Quando o plasma magnetizado se movimenta, como é o caso do plasma interplanetário em torno de Saturno, este processo é capaz de produzir corrente elétrica. A corrente de anel equatorial que existe na magnetosfera de Saturno apresenta um fluxo de aproximadamente 10 milhões de ampères que circulam a quase 600.000 quilômetros acima do planeta (Meltzer 2015).

Dados obtidos pelo equipamento MIMI (sigla do inglês *Magnetospheric Imaging Instrument*) da Cassini revelam que o formato da corrente se assemelha ao da aba de um chapéu e apresenta uma espessura de aproximadamente $1,5 R_S$ (raio de Saturno) durante o dia e $\sim 0,5 R_S$ durante a noite. O instrumento MIMI foi essencial para que os cientistas pudessem “visualizar” o plasma interplanetário e os cinturões magnéticos presentes em Saturno a partir de dados coletados *in situ*, até então jamais obtidos, além de proporcionar uma investigação da magnetosfera de dentro do sistema de Saturno.

A corrente de anel é um fenômeno que ocorre tanto na Terra e em Saturno quando o plasma interplanetário fica aprisionado nas linhas de campo magnético dos planetas. Acredita-se que as correntes são originárias a partir do material proveniente dos anéis deste planeta bem como dos gases emitidos pelos gêiseres de sua lua gelada Encélado, evidenciando um acoplamento que existe entre esses objetos, como será detalhado mais à frente na seção 5.

Outro fenômeno que também está diretamente relacionado com o campo magnético é a ocorrência de radiação quilométrica de Saturno (sigla do inglês *Saturn Kilometric Radiation* - SKR) (Desch 1982). Essas emissões podem estar relacionadas com a interação do vento solar que interage com o campo magnético nos polos de Saturno e que também provocam a ocorrência das auroras boreais (Gurnett *et al.* 2004). Essa correlação foi investigada utilizando o equipamento RPWS a bordo da Cassini em conjunto com os dados obtidos pelo satélite espacial Hubble. As observações revelaram que as SKR ocorriam ao mesmo tempo que as auroras.

Além da SKR, ondas de plasma também são fenômenos que envolvem um conjunto de partículas carregadas interagindo com oscilações de campos elétricos e magnéticos. A sonda Cassini obteve os primeiros indícios de ocorrência de ondas de plasma quando se aproximava do planeta em março de 2004 quando detectou uma explosão de plasma de elétrons a aproximadamente $825 R_S$. Isso só foi possível, devido ao fato de que o fluxo de elétrons se alinhou com o vento solar e a frente de choque do campo magnético de Saturno (Gurnett 2005). A frente de choque é uma região de interface onde a velocidade do vento solar sofre um decréscimo abrupto devido ao encontro com a magnetosfera do planeta.

Cassini pôde “ouvir” a passagem através da frente de choque utilizando o instrumento RPWS (sigla do inglês *Radio and Plasma Wave Science*), bem como detectou vários tipos de ondas de plasma dentro e fora da magnetosfera do planeta, sendo a mais intensa detectada a aproximadamente $10 R_S$.

Através dos dados coletados pela Cassini, verificou-se que o sistema de Saturno está interconectado o que significa que seus anéis, satélites e magnetosfera trocam material e influenciam as características e comportamento de uns aos outros. Durante os sobrevoos da Voyager, acreditava-se que a magnetopausa se estendia até $20 R_S$. Com a chegada de Cassini, os dados coletados (Achilleos *et al.* 2008) sugeriam que sua influência estava compreendida na faixa de 22 até $27 R_S$.

Antes de Cassini, as missões Pioneer e Voyager já haviam verificado a ocorrência de interação da magnetosfera de Saturno com suas luas a partir de troca de partículas (Van Allen 1980, Stone 1981, Kaiser 1980). A Cassini corroborou essas observações e ainda mostrou que a magnetosfera interage com a lua gelada Encélado a partir da emissão de partículas de poeira gelada provenientes do fenômeno de criovulcanismo que ocorrer no interior desta lua, como será melhor detalhado na seção 5.

III. ANÉIS DE SATURNO APÓS CASSINI

Com a chegada de Cassini ao sistema de Saturno, ampliamos nossa compreensão sobre a composição, dinâmica, origem e evolução dos anéis, obtivemos maior entendimento sobre os anéis difusos e interação dos anéis com a magnetosfera de Saturno e seus satélites como mostrado na Figura 5 onde é possível ver a interação do satélite Prometeus (Meltzer 2015), que tem formato de uma batata, com o anel F. Enquanto Prometeus “rouba” partículas dos anéis, a lua Encélado fornece partículas proveniente de seus gêiseres (Dougherty, 2018), como será discutido na seção V.

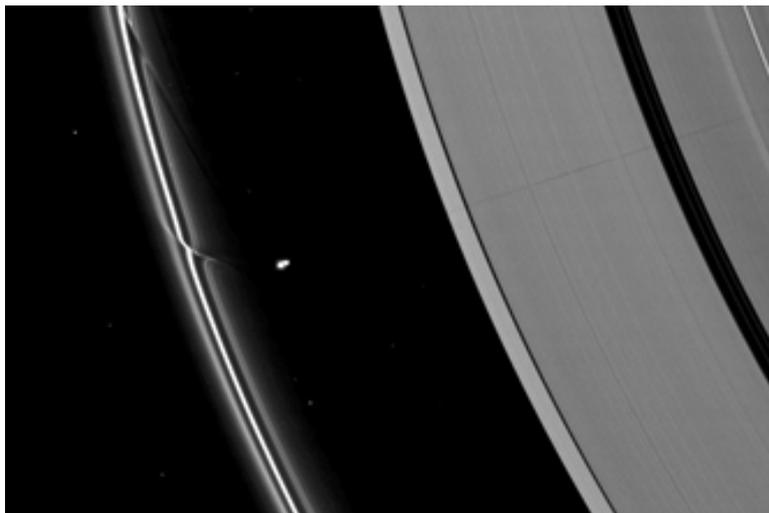


Figura 5: Efeitos da passagem da lua Prometeus de Saturno pelo anel F. **Fonte:** NASA/JPL PIA12537.

Os anéis de Saturno são divididos em dois grupos que exibem propriedades diferentes: o grupo dos anéis principais que compreendem os anéis A, B e C e o grupo dos anéis difusos

Pallene, Methone e Anthe. Alguns fenômenos bastante interessantes ocorrem nos anéis difusos. São processos de plasma de poeira em que grãos de poeira se comportam como detritos de colisão. Como por exemplo, no anel difuso G, as partículas de poeira são influenciadas pela radiação solar e são esculpidas estruturas periódicas, bem como ocorre com o anel D. Desta forma, os anéis difusos foram um excelente laboratório para investigar os fenômenos relacionados com a poeira de plasma.

Vale notar que fenômenos de poeira de plasma também ocorrem no anel B nos assim chamados spokes, que são marcas aproximadamente radiais e intermitentes que são produzidas por pequenas partículas de poeira carregadas que se encontram elevadas do corpo do anel devido à repulsão eletrostática (Horányi *et al.* 2009). A necessidade de explicar como e porque que os spokes ocorriam levaram o surgimento do campo de pesquisa chamado plasma de poeira, outra descoberta da missão Cassini-Huygens. Uma ideia da formação dos spokes é a formação de avalanches induzidas por impactos entre pequenas partículas de poeira de plasma (Tagger *et al.* 1991, Yaroshenko *et al.* 2008, Hamilton 2006).

IV. TITÃ DESVELADA

A maior lua de Saturno, Titã, apresenta uma atmosfera espessa o que dificultava sua investigação a partir de instrumentos localizados na Terra. Entretanto, com a Cassini e seus instrumentos foi possível obter informações inimagináveis a partir de um orbitador no sistema de Saturno, mais perto do que qualquer outro instrumento construído pelo homem. Imagine poder investigar esta lua por uma sonda localizada no próprio satélite. Tal feito foi realizado pela sonda europeia Huygens e neste capítulo será discutido os principais resultados obtidos por essa missão audaciosa.

Esse foi um dos aspectos mais interessantes da missão Cassini: o fato de que sua sonda Huygens seria lançada em direção a Titã para obter dados enquanto estivesse mergulhando dentro de sua atmosfera densa para revelar sua superfície e toda física escondida por debaixo de suas nuvens de hidrocarbonetos.

Antes da chegada de Cassini, tudo que se conhecia sobre Titã era seu tamanho e que sua atmosfera densa era rica em nitrogênio. Os dados obtidos pela missão Cassini-Huygens revelaram que Titã possui mares e lagos de metano e etano líquidos que são reabastecidos por chuvas que precipitam de nuvens de hidrocarbonetos. Além disso, a missão revelou que abaixo da superfície de Titã existe um oceano líquido que contém água e amônia, que são indicativos de que possivelmente há vida neste satélite. Algo meramente especulativo, mas que desperta a curiosidade dos cientistas planetários.

Durante a descida da sonda Huygens pela densa atmosfera de Titã, o instrumento DISR (sigla do inglês *Descent Imager/Spectral Radiometer*) (Tomasko *et al.* 1999) foi importante para determinar as propriedades de espalhamento e absorção da névoa de Titã em função da altitude. Esses dados foram utilizados para modelagem dos sinais utilizados pelos equipamentos VIMS e ISS da Cassini para obter a maior quantidade de dados sobre a superfície deste satélite. A Figura 7 mostra detalhes geológicos de Titã bem como é possível ver rios e afluentes. Entretanto, devido às baixas temperaturas da lua, esses rios não são constituídos de água, mas sim de hidrocarbonetos (Lorenz, 2008).

A descida da sonda Huygens foi uma surpresa devido ao fato de que os cientistas não

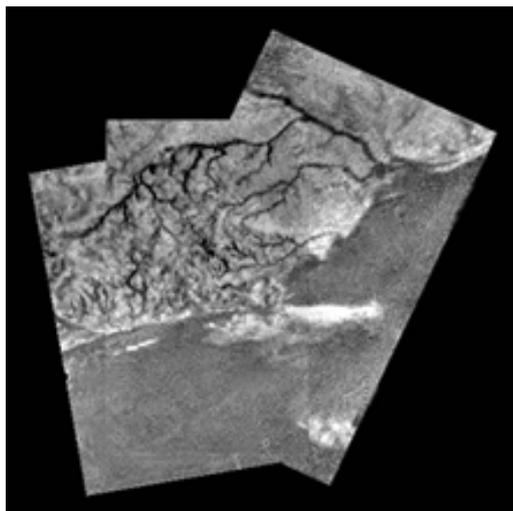


Figura 7: *Mosaico de canal de rio e área de cume da superfície de Titã obtidos pela sonda europeia Huygens. Fonte: NASA/JPL/ESA. PIA07236.*

sabiam ao certo onde a sonda iria pousar, se a aterrissagem ocorreria sobre um terreno rochoso ou se ocorreria dentro de um líquido. Por sorte, a sonda aterrissou em terreno rochoso em janeiro de 2005 e, assim, foi possível obter a primeira imagem colorida da superfície de Titã, Figura 8. É possível notar que algumas rochas de gelo localizadas em primeiro plano nesta figura apresentam formato levemente arredondado e se assemelham com seixos presentes aqui na Terra, indicando provavelmente que o local de aterrissagem foi no passado um rio de hidrocarbonetos (Lorenz, 2008).



Figura 8: *Primeira fotografia colorida da superfície de Titã. Note a presença de rochas em formato levemente arredondado como seixos. Fonte: NASA/JPL/ESA. PIA07232.*

Durante a descida, a sonda europeia coletou dados da atmosfera densa e espessa de Titã para melhor compreensão de sua atmosfera bem como fez imagens de sua superfície. Além de “sobreviver” à aterrissagem, a sonda continuou a enviar dados para Cassini após algumas

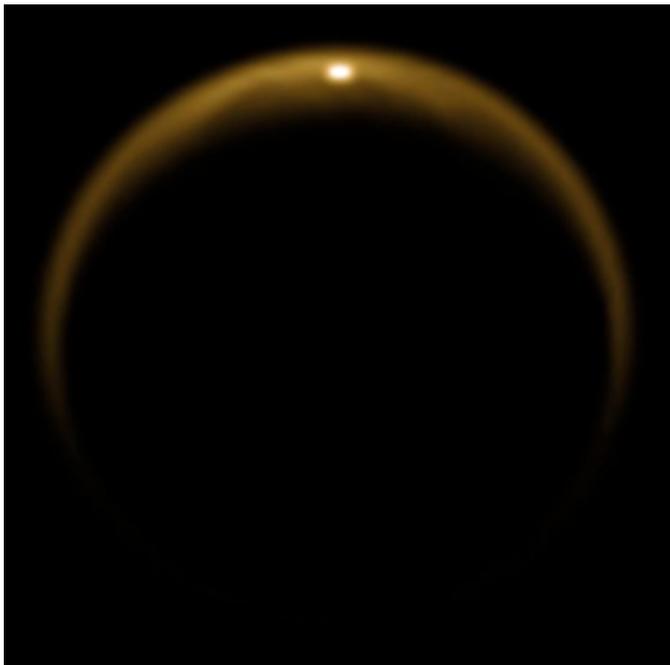


Figura 9: Reflexo da luz solar incidente na superfície de um lago de hidrocarboneto localizado no hemisfério norte de Titã. **Fonte:** NASA/JPL/ESA. PIA12481.

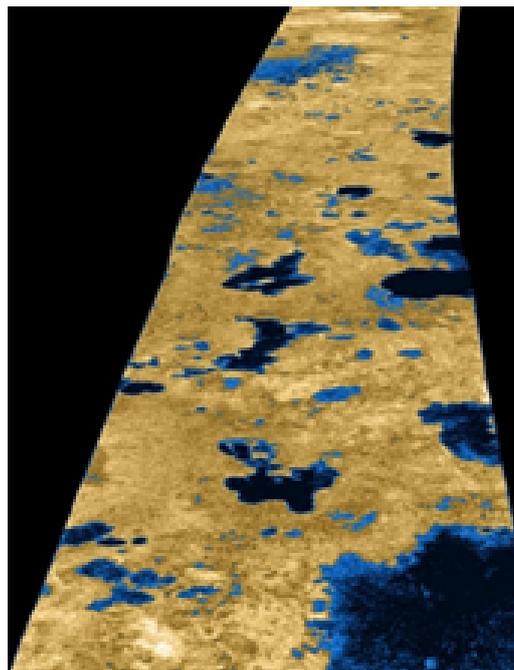


Figura 10: Imagem em cores falsas da superfície do hemisfério norte de Titã onde é possível observar a presença de lagos de diversos tamanhos. A cor azul escura foi usada aqui para realçar a diferença entre o terreno sólido e os entornos dos lagos. **Fonte:** NASA/JPL/ESA. PIA09102.

horas até que a energia de suas baterias fosse esgotada.

Enquanto a sonda Huygens mergulhava a atmosfera de Titã, a nave Cassini realizava sobrevoos sobre a lua e outros corpos do sistema de Saturno. Em um de seus sobrevoos o instrumento VIMS obteve a imagem da Figura 9. Essa imagem mostra a reflexão da luz solar na faixa do infravermelho que incidiu em um lago de hidrocarboneto de Titã confirmando, assim, que haviam lagos de metano e etano líquidos no hemisfério norte desta lua gelada (Lorenz, 2008). A concentração de lagos e oceanos de hidrocarbonetos é maior no hemisfério norte do que no hemisfério sul. Vale notar que atmosfera densa e espessa de Titã absorve e espalha a maior parte dos comprimentos de onda da luz, incluindo o espectro visível. Entretanto, uma pequena parcela desta radiação pôde escapar das nuvens o que permitiu a obtenção desta imagem (Jaumann *et al.* 2009).

Outra constatação de que Titã possui lagos e oceanos de material líquido foi obtido a partir dos dados coletado pelo instrumento RADAR da Cassini (Elachi *et al.* 1999). A Figura 10 mostra uma imagem em cores falsas de lagos de hidrocarbonetos. Essa foi uma das primeiras imagens divulgadas pela NASA sobre o que a sonda Cassini “viu” ao efetuar sobrevoos próximos a maior lua de Saturno. Nesta imagem, é possível ver lagos de diversos tamanhos distribuídos pelo terreno de Titã localizado a aproximadamente 80° do hemisfério

norte.

Uma vez que se tornou possível “visualizar” a superfície de Titã a partir dos dados obtidos por vários instrumentos a bordo da Cassini e instalados na sonda Huygens, se constatou que Titã apresentava algumas poucas crateras o que mostra que sua superfície é recente e sofreu algum processo de renovação ao longo dos anos, o que é um forte indício de alta atividade geológica e uma superfície jovem. Portanto, as crateras de impacto foram apagadas devido a atividades tais como erosão, criovulcanismo e sedimentação de partículas de hidrocarbonetos em suspensão na atmosfera. A partir dos dados obtidos pelo instrumento RADAR da Cassini, foi possível realizar o mapeamento de algumas dessas crateras de impacto, e assim, estimar a idade da superfície desta lua em algo em torno de 200 milhões de anos a 1 bilhão de anos (Lopes, 2020). Outra descoberta obtida pela sonda Cassini em relação à superfície de Titã foi a observação de dunas, de planícies, de montanhas e estruturas em formas de labirintos como constatado na Figura 11.

Além disso, dados de anos de investigação de Titã obtidos pelo orbitador Cassini e pela sonda Huygens revelaram que o metano passa por ciclos semelhante ao ciclo da água na Terra. Existem nuvens de hidrocarbonetos que precipitam em chuvas, rios, lagos, canais fluviais e oceanos de hidrocarbonetos. A geologia desta lua apresenta estruturas de planícies e dunas, Figura 11. Há atividade atmosférica e ventos que sedimentam partículas de gelo e de poeira. Além de montanhas e crateras de criovulcanismo.

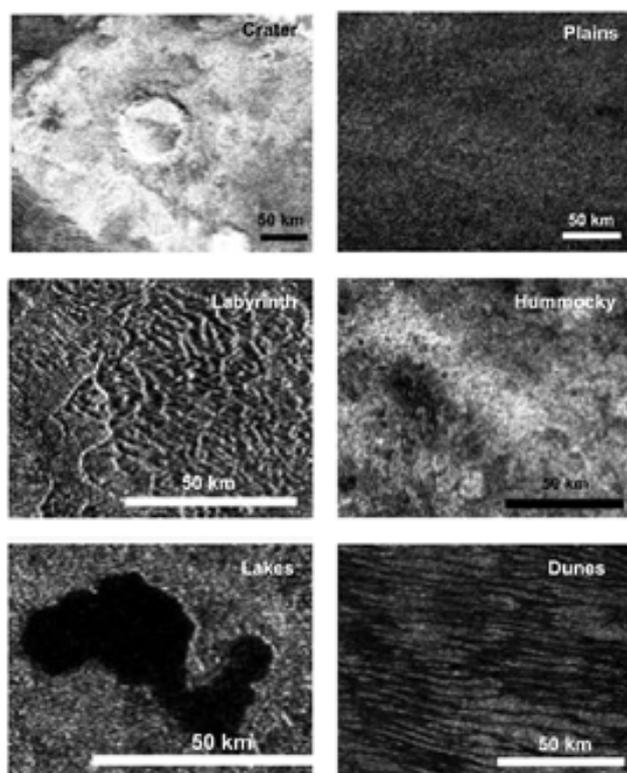


Figura 11: *Imagens de crateras, planícies, labirintos, hummocky, lagos e dunas localizados sobre a superfície de Titã, revelando que a lua apresenta muita atividade geológica. Fonte: Lopes et al. 2020.*

Após a missão Cassini, há indícios de que Titã esconda um oceano líquido debaixo de sua superfície composto principalmente por água e amônia. Sabemos também que o satélite

possui lagos e mares de hidrocarbonetos líquidos localizados próximo aos seus polos e que possui vastas regiões áridas ricas em dunas de hidrocarbonetos.

V. ENCÉLADO: UM MUNDO ATIVO

Assim que a espaçonave Cassini entrou em órbita em torno de Saturno, foi revelado que Encélado é um mundo ativo com jatos de gêiseres no seu polo sul (Schenk, 2018). As somas das descobertas obtidas formaram as correntes de pensamento sobre a origem de Encélado e permitiu a caracterização de sua superfície geoquímica e seu oceano localizado abaixo de sua superfície. Medidas químicas e de propriedades do bulk alimentaram modelos de estado da arte sobre seu interior e seu complexo efeito de maré-térmico que esta lua experimenta e permitiu construir cenários nos quais oceanos sob sua superfície tem bastante tempo de existência e provavelmente constitui ingredientes necessários para a formação de vida.

Acreditava-se que esta lua seria muito pequena para apresentar atividade geológica até mesmo pelo fato de que seu calor interior deveria ter sido perdido para o frio do espaço a bilhões de anos atrás (Meltzer, 2015). As sondas Voyagers possibilitaram a constatação de que a superfície de Encélado apresentava poucas crateras o que sugeria que o satélite experimentava algum tipo de renovação que ocorresse em sua superfície. Essas eram algumas pistas de que havia alguma atividade geológica acontecendo ali.

Com a chegada de Cassini ao sistema de Saturno, pôde-se perceber que de fato Encélado era muito brilhante e quase todas as regiões de sua superfície apresentavam alto albedo sugerindo que a superfície do satélite fosse recoberta por uma camada de neve dando indícios de que esta lua fosse revestida de material fresco (Spencer *et al.* 2006). Essa é uma característica de superfície jovem. Outro fator que corrobora esta evidência é o fato de que a superfície de Encélado tem poucas crateras. Quanto mais crateras, mais velha é a superfície do corpo celeste.

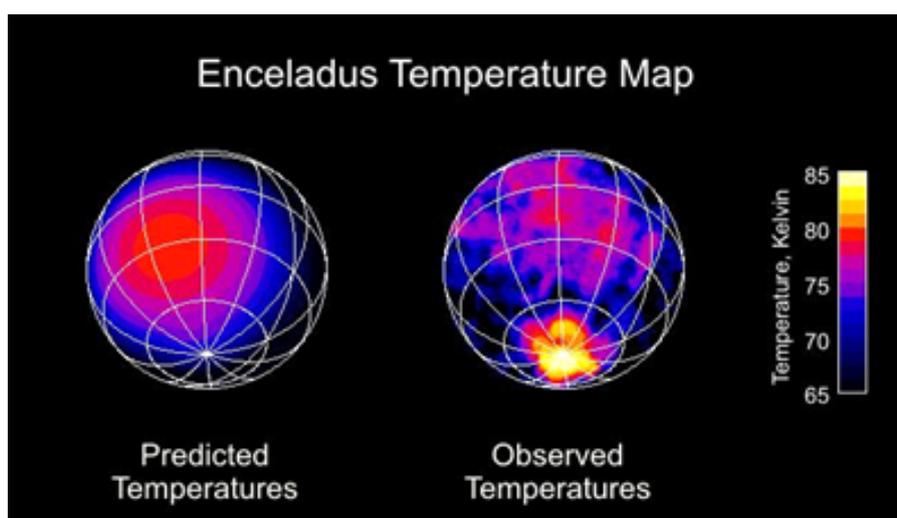


Figura 12: Mapa de temperatura de Encélado obtido pelo CIRS da Cassini. O painel à esquerda mostra a temperatura prevista para o polo sul enquanto que o painel à direita mostra a temperatura observada. Fonte: Imagem adaptada de NASA/JPL/GSFC. PIA06432.

A Figura 12 apresenta o primeiro mapa térmico obtido a partir dos dados coletados pelo instrumento CIRS da Cassini. Após os primeiros sobrevoos da Cassini por Encélado, se especulou que o satélite apresentasse temperaturas baixas nos polos como o que ocorre aqui na Terra e em outros corpos celestes devido à incidência oblíqua dos raios solares. Entretanto, o que se observou foi que o polo sul deste satélite apresenta temperaturas mais altas o que sugere que ocorra algum mecanismo de aquecimento em seu interior (Meltzer, 2015), como por exemplo forças de maré entre a lua e Saturno e libração.

Os sobrevoos de Cassini por Encélado diminuíram suas altitudes de 1000 km para 168 km acima da superfície desta lua. Nessas oportunidades, se verificou que havia a ejeção de material enceladeano que emanava do polo sul deste satélite que foram analisados pelo instrumento CDA (sigla do inglês *Cosmic Dust Analyzer*) da Cassini (Srama *et al.* 2002) que por sua vez detectou grão de gelo (Postberg *et al.*, 2018). Ao mesmo tempo, a equipe UVIS realizou a primeira detecção de atmosfera em Encélado quando o satélite atravessou em frente a estrela Gamma Orionis (Hansen *et al.* 2006). Nesta ocasião, foi possível verificar que a luz da estrela diminuiu e seu espectro se modificou ao atravessar a atmosfera da lua, indicando a presença de vapor d'água. Outras ocultações foram investigadas pelo UVIS tais como a da estrela Zeta Orionis, de Épsilon Orionis, e do Sol e todas detectaram de maneira inequívoca a presença de água.

O polo sul de Encélado brilha, aparentemente devido às fontes de calor localizadas nas Listras de Tigre que são fissuras paralelas manchadas com material orgânico de coloração azulada, Figura 13. É através dessas fissuras que vapor d'água, gelo e partículas de poeira são lançadas para fora do satélite (Porco *et al.*, 2014).

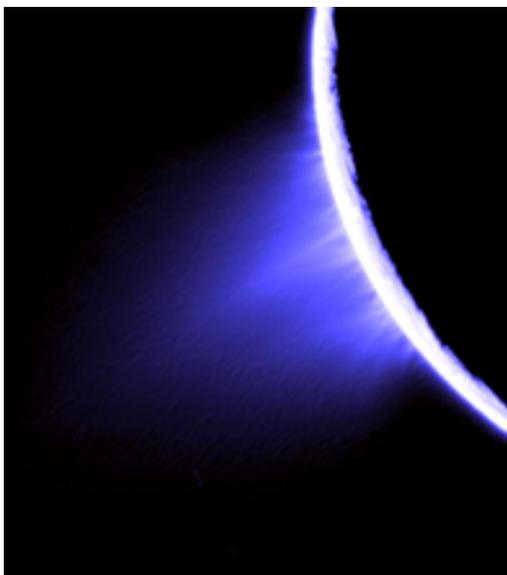


Figura 13: Imagem em cores falsas dos jatos de vapor d'água localizados no polo sul de Encélado que jorram matéria para o espaço em forma de pluma. **Fonte:** NASA/JPL. PIA08386.

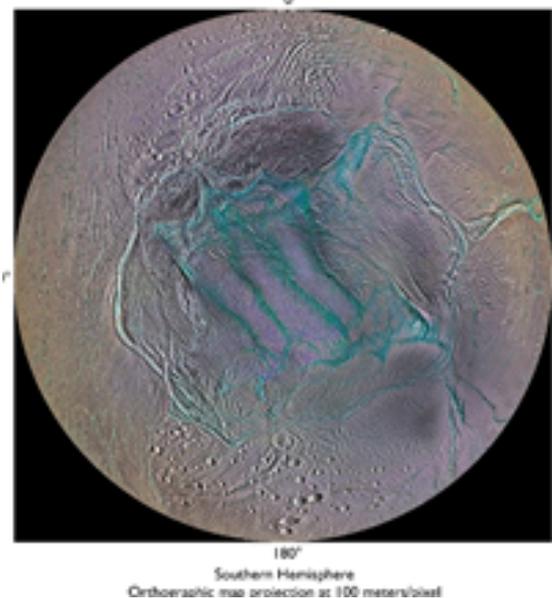


Figura 14: Mapa do polo sul de Encélado obtido pela sonda Cassini onde é possível identificar a região mais ativa desta lua gelada conhecida como listras de tigre. **Fonte:** NASA/JPL/Caltech. PIA18435.

Encélado desempenha um papel importante na conexão com o anel E de Saturno e sua magnetosfera. O que é mais impressionante é o fato do anel E ser mais denso justamente na órbita de Encélado o que sugere que este satélite seja sua maior fonte de partículas. O equipamento CDA da Cassini observou que pequenos grãos de gelo provenientes de erupções do polo sul estavam reabastecendo o anel E, durante o sobrevoo a 168 km acima da superfície de Encélado o que possibilitou medir diretamente as partículas emanadas pelas Listras de Tigre. O que se constatou foi que as partículas mais lentas não eram capazes de vencer a atração gravitacional com a lua, mas as partículas velozes tinham energia suficiente para escapar e compor o anel E (Spahn *et al.*, 2006).

Durante o sobrevoo de maior aproximação da Cassini em direção a Encélado, os instrumentos CDA e INMS (sigla do inglês *Ion and Neutral Mass Spectrometer*) (Waite *et al.* 2004) detectaram ao mesmo tempo um aumento abrupto na taxa de contagem de partículas juntamente com vapor d'água. Em sobrevoos anteriores, os instrumentos UVIS e MAG (sigla do inglês *Magnetometer*) (Dougherty *et al.* 2002) também detectaram a formação de uma pluma (Figura 13). Essas observações só podem ser compreendidas se gás e poeira estiverem sendo ejetadas para fora de Encélado, na região do polo sul do satélite (Spahn *et al.*, 2006). Impactos com micrometeoroides também podem lançar ao espaço partículas de gás e poeira e suas velocidades são condizentes com as velocidades das partículas detectadas pelos instrumentos da Cassini que variam de alguns km/s até dezenas de km/s. Contudo, vale ressaltar que as partículas detectadas acima da região do polo sul apresentavam temperaturas relativamente altas imediatamente acima das fissuras conhecidas com Listras de Tigre (Figura 14), o que suporta a teoria de que ocorra o fenômeno de criovulcanismo no interior desta lua (Spahn *et al.*, 2006).

O instrumento CDA da Cassini analisou a constituição das partículas que compõem o anel E e que são presumidamente provenientes de Encélado. O resultado foi surpreendente: se detectou sais de sódio (Postberg *et al.*, 2018). A maneira mais provável de incorporação de sais nas moléculas de grão de gelo é a partir de minérios localizados no interior de Encélado e que foram depositados no fundo de camadas líquidas localizadas abaixo da superfície desta lua. Deste modo, os instrumentos inferiram a existência de um enorme reservatório de água líquida, talvez até um oceano, por debaixo da superfície de Encélado (Brown 2009).

A suposição de que haja um oceano de água líquida abaixo da superfície de Encélado tem algumas implicações tais como um ambiente adequado para a evolução de elementos precursores que poderiam originar vida, uma vez que os instrumentos da Cassini detectaram compostos orgânicos nas plumas desta lua. Além disso, a energia térmica que emana do polo sul poderia ser um ingrediente a mais para gerar vida neste ambiente. O que ainda não se sabe é a forma deste reservatório de água. Se existem bolsões localizados de água ou se de fato existe um oceano que envolve parte ou todo satélite e que esteja em contato com um núcleo rochoso. Outra incógnita é o mecanismo de aquecimento que fornece energia térmica no polo sul. Como mencionado anteriormente, forças de maré entre a lua e Saturno e libração são exemplos de possíveis mecanismos de aquecimento (Hemingway *et al.* 2018).

Encélado é responsável por bastante material que compõe o anel E. Entretanto, Cassini descobriu que boa parte da massa desta lua também se deposita na parte exterior do anel A localizado a mais de 100.000 km desta lua (Farrel *et al.* 2008). O mecanismo de transporte de partículas de gelo por uma distância tão longa seria devido a ação de campos magnéticos

que fornece o caminho para o acoplamento entre os dois corpos. As partículas de gelo quando são expelidas pelas Listras de Tigre podem eventualmente colidir com outros corpos e sofrer processos de ionização e eletrização ou até mesmo serem ionizadas pela luz solar formando assim um gás de plasma de partículas eletricamente carregadas prontas para serem carregadas pelos intensos campos magnéticos presentes no interior da magnetosfera de Saturno. As partículas que são aceleradas pelos campos magnéticos e podem atingir velocidades altíssimas ao ponto de se tornarem extremamente energéticas e são, então, absorvidas pelo anel A. Essa é uma forte evidência de que os anéis de Saturno funcionam como um escudo protetor do próprio planeta e do ambiente interplanetário uma vez que os anéis atuam mitigando a radiação ao redor do planeta ao absorver partículas de baixa e alta energia (Farrel *et al.* 2008)

As partículas expelidas pelos gêiseres de Encélado interagem com a magnetosfera de Saturno de uma forma bastante interessante. Antes de serem ejetadas, essas partículas podem adquirir carga elétrica através de vários mecanismos como atrito com outras partículas, fotoionização, colisão com elétrons, dentre outros. A pluma de Encélado é constituída tanto por partículas neutras como por íons e essas partículas influenciam a magnetosfera de Saturno em características tais como densidade de massa e padrões de fluxo (Kilveson *et al.* 2006). As linhas de campo magnético se comportam como se estivessem congeladas no plasma. Quando a magnetosfera e seu plasma contorna Encélado, o que se observa é que as linhas de campo parecem desviar do corpo celeste provocando perturbações no ambiente magnético. Foram essas perturbações que foram detectadas pelo instrumento MAG da Cassini e que possibilitou o mapeamento da pluma de vapor d'água e partículas de poeira que emanam desta pequena lua.

Definitivamente, a missão Cassini-Huygens alterou fundamentalmente nossos conceitos sobre onde a vida pode ser encontrada em nosso Sistema Solar e além. Os oceanos de Encélado podem conter os ingredientes para vida microbiana e moléculas orgânicas. Os efeitos de maré, devido à presença de Saturno, mantêm oceanos líquidos por debaixo da superfície gelada dessa lua e permite que ela seja um abrigo para vida extraterrena. Isso abre a janela e possibilidades de se encontrar vida além do planeta Terra.

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sobrevoos realizados pela espaçonave Cassini foram essenciais na investigação de fenômenos atmosféricos que ocorrem em Saturno. As correntes de jatos de ventos produzidos no polo norte do planeta apresentam uma estrutura em forma de hexágono, o que é intrigante já que as correntes de jato que ocorrem aqui na Terra são linhas abertas. Tempestades chamadas de Grande Mancha Branca varrem o planeta em latitudes próximas ao plano equador do planeta.

Campos gravitacionais intensos são produzidos no planeta devido ao movimento de íons de hidrogênio localizados no interior do planeta. Desta forma, a magnetosfera do planeta serve como um escudo protetor contra as partículas carregadas provenientes de ventos solares. Da mesma maneira como ocorre na Terra, as partículas carregadas que compõem o vento solar podem ficar aprisionadas nas linhas de campo magnético e, por sua vez, podem migrar para os polos do planeta e interagir com os elementos que constituem sua

superfície proporcionando emissões de radiação de auroras polares que foram detectadas pelos instrumentos ISS, VIMS e UVIS da Cassini.

Os instrumentos MAG e RPWS da Cassini foram importantes na determinação da estrutura da magnetosfera de Saturno, detectando correntes de anel, interação das partículas dos anéis com a magnetosfera do planeta e interações entre os anéis e as luas do planeta. Com os instrumentos que viajaram a bordo de Cassini, foi possível investigar de perto os anéis de Saturno, a principal característica do planeta que tanto chama atenção.

Ao chegar no sistema de Saturno e se tornar a primeira espaçonave a orbitar o planeta anelado, Cassini começou a realizar sobrevoos pelas luas geladas e deu início ao lançamento da sonda Huygens em direção a Titã. Após vários sobrevoos, a espaçonave conseguiu obter informações valiosas sobre a superfície da maior lua de Saturno, até então velada pela atmosfera espessa de nuvens de hidrocarboneto.

Os instrumentos RADAR e VIMS da nave Cassini foram essenciais na obtenção de mapas geológicos da superfície de Titã. Foram observados dunas, rios, lagos, oceanos, colinas, montanhas, crateras e planícies, revelando que a geologia de Titã apresenta muita semelhança com a geologia da Terra. Entretanto, uma diferença crucial: os rios, os lagos e os oceanos em Titã não poderiam ser formados por água líquida devido às baixas temperaturas do satélite. Outras substâncias fazem o papel da água em Titã: são os hidrocarbonetos metano e etano que podem ser encontrados nos três estados da matéria. Esses hidrocarbonetos sofrem transformações semelhantes às que ocorrem no ciclo da água aqui na Terra. Hidrocarbonetos compõem as nuvens da atmosfera de Titã, precipitam em forma líquida para preencher os rios, lagos e oceanos. Partículas de poeira e gelo de hidrocarbonetos em suspensão na atmosfera se depositam nas planícies de Titã proporcionando o surgimento de estruturas fantásticas na superfície deste satélite.

Enquanto Huygens efetuava sua descida em Titã, Cassini realizava sobrevoos pelas outras luas de Saturno e, ao sobrevoar Encélado, as imagens obtidas pelos instrumentos de sensoriamento remoto ISS, CIRS e VIMS revelaram que este satélite tinha uma superfície com poucas crateras de impacto o que revelava ser um indicativo de atividade geológica nesta lua e seu polo Sul apresentava as maiores temperaturas registradas na lua. Além disso, os instrumentos de campo e de partícula foram capazes de detectar a presença de moléculas de água, amônia e metano que eram expelidas por enormes gêiseres localizadas no polo sul do satélite e de onde era possível ver uma enorme pluma. Essas pistas revelaram que a superfície desta lua também apresenta criovulcanismo e possivelmente esconde um enorme oceano de água líquida por debaixo de sua crosta. Onde tem água, pode haver vida!

O instrumento CDA da Cassini pôde caracterizar as partículas e rastreá-las até os anéis E e A de Saturno além de revelar que o campo magnético deste planeta era ligeiramente perturbado ao redor de Encélado revelando um acoplamento entre o planeta, seus anéis e suas luas, não somente Encélado, mas também aquelas cujas órbitas atravessam os anéis perturbando-os e provocando fenômenos de plasma tais como ondas de plasma que se propagavam pelos anéis.

Cassini foi sepultada na superfície do “Senhor dos anéis” na manobra que ficou conhecida como *Grand Finale*. Ao contrário da sonda Huygens, a espaçonave não foi esterilizada e poderia ainda carregar microorganismos da Terra. Não era possível arriscar que essa nave aterrissasse em alguma lua do sistema de Saturno e a contaminasse com material orgânico

vivo proveniente da Terra. Se por acaso fosse detectada vida nesta lua, não haveria como saber se ela seria originária da Terra ou se de fato era extraterrestre. Deste modo, após todo combustível da espaçonave ter sido esgotado, a espaçonave Cassini encerra sua missão sendo lançada em direção à superfície de Saturno para que a nave fosse totalmente destruída. Assim, este trabalho sintetizou algumas das principais descobertas sobre Saturno e suas luas geladas Titã e Encélado obtidas pela missão Cassini-Huygens que se estendeu por quase vinte anos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Astrofísica Gravitacional e Física Espacial (AGFE) realizado pela Universidade de Brasília.

REFERÊNCIAS

ACHILLEOS, N., et al. (2008). Large-Scale Dynamics of Saturn's Magnetopause: Observations by Cassini, *Journal of Geophysical Research* 113, A11209.

AGUIAR, A. C. B., et al. (2010). A laboratory model of Saturn's North Polar Hexagon, *Icarus*, 206: 755-763.

BAINES, K. H., et al. (2009a). *Saturn's north polar cyclone and hexagon at depth revealed by Cassini/VIMS*. Planet. Space Sci., in press.

BAINES, K. H., et al. (2009b). The deep clouds of Saturn: Morphology, spatial distribution, and dynamical implications as revealed by Cassini/VIMS. *Icarus*.

BROWN, D., e Agle D. C. (2009). Salt Finding from NASA's Cassini Hints at Ocean within Saturn Moon, *NASA news*.

BROWN, R. H., et al. (2004). The Cassini Visual and Infrared Mapping Spectrometer (VIMS) Investigation. In C. T. Russel. *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter Remote Sensing Investigations*, Springer.

CARROL, B. W., e Ostlie D. A. (2017). *An Introduction to Modern Astrophysics*, Cambridge University Press.

COLWELL, J. E., et al. (2009). The Structure of Saturn's Rings. In M. K. Dougherty, L. W. Esposito, S. M. Krimigis, eds. *Saturn from Cassini-Huygens*, Springer.

COUSTENIS, A., et al. (2009). Earth-Based Perspective and Pre-Cassini-Huygens Knowledge of Titan. In: *Titan from Cassini Huygens*, Springer.

DEL GENIO, A. D., et al. (2009). Saturn Atmospheric Structure and Dynamics. In M. K. Dougherty, L. W. Esposito, S. M. Krimigis, eds. *Saturn from Cassini-Huygens*, Springer.

DESCH, M. D. (1982). Evidence for Solar Wind Control of Saturn Radio Emission, *J. Geo. Res.* 87, 4549–4554.

DOUGHERTY, M. K., et al. (2002). The Cassini Magnetic Field Investigation. In C. T. Russel. *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter In-Situ Investigations*, Springer.

DOUGHERTY, M. K., Seidelmann B. J., e Spencer J. R. (2018). Enceladus as an Active World: History and Discovery. In P. M. Schenk et al., eds. *Enceladus and the Icy Moons of Saturn*. (pp. 3-16). Univ. of Arizona, Tucson.

DYUDINA, U.A., et al. (2007). Lightning storms on Saturn observed by Cassini ISS and RPWS during 2004–2006. *Icarus* 190, 545–555.

ELACHI, C., et al. (1999). Radar: The Cassini Titan Radar Mapper. In C. T. Russel. *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter Remote Sensing Investigations*, Springer.

ESPOSITO, L. W., et al. (2000). The Cassini Ultraviolet Imaging Spectrograph Investigation. In C. T. Russel. *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter Remote Sensing Investigations*, Springer.

ESPOSITO, L. W., et al. (2004). The Cassini Ultraviolet Imaging Spectrograph Investigation. *Space Sci. Rev.* 115, 299–361.

FARRELL, W. (2008). *Enceladus is Supplying Ice to Saturn's A-Ring*, Universe Today.

FLASAR, F. M., et al. (2004). Exploring the Saturn System in the Thermal Infrared: The Composite Infrared Spectrometer. In C. T. Russel. *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter Remote Sensing Investigations*, Springer.

FLETCHER, L. N., et al. (2008). Temperature and composition of Saturn's polar hot spots and hexagon. *Science* 319, 79–81.

GURNETT, D. A. et al. (2004). The Cassini Radio and Plasma Wave Science Investigation. *Space Sci. Rev.* 114, 395–463.

GURNETT, D. A. (2005). Radio and Plasma Wave Observations at Saturn from Cassini's Approach and First Orbit, *Science* 307, 1255–1259.

HAMILTON, D. P. (2006). The collisional cascade model for Saturn's ring spokes. *Bull. Am. Astron. Soc.* 38, 578.

HANSEN, C. J., et al. (2006). Enceladus' water vapor plume. *Science*, 311, 1423-1425.

HARTLE, R. E. (1985). Interaction of Titan's Atmosphere with Saturn's Magnetosphere,

Advances in Space Research, 5, 321–332.

HEMINGWAY, D., et al. (2018). The Interior of Enceladus. In P. M. Schenk et al., eds. *Enceladus and the Icy Moons of Saturn*. (pp. 129-162). Univ. of Arizona, Tucson.

HORÁNYI, M. et al. (2009). Diffuse Rings. In M. K. Dougherty, L. W. Esposito, S. M. Krimigis, eds. *Saturn from Cassini-Huygens*. Springer.

HUBBARD, W. B., et al. (2009). The Interior of Saturn. In M. K. Dougherty, L. W. Esposito, S. M. Krimigis, eds. *Saturn from Cassini-Huygens*. Springer.

HULTQVIST, B. (2007). The Aurora. In: Y. Kamide/A. Chian, *Handbook of the Solar-Terrestrial Investigations of Jupiter and Saturn Environment*. J. Astron. 67 (??) 333-354.

JAUMANN, R., et al. (2009.) Geology and Surface Processes on Titan. In: *Titan from Cassini Huygens*, Springer.

JOHNSON, T. V. e Estrada P. R. (2009). Origin of the Saturn System. In M. K. Dougherty, L. W. Esposito, S. M. Krimigis, eds. *Saturn from Cassini-Huygens*. Springer.

KAISER, M. L., et al. (1980). Voyager Detection of Nonthermal Radio Emission from Saturn, *Science* 209, 1238.

KEPLER, S. O., e SARAIVA M. F. O. (2017). *Astronomia e Astrofísica*, 4^{ed.}, São Paulo: Editora Livraria da Física.

KIVELSON, M. G. et al. (2006). Does Enceladus Govern Magnetospheric Dynamics at Saturn? *Science* 311, 1391–1392.

LEDVINA, S. A. (2004). Titan's Induced Magnetosphere, *Advances in Space Research* 33, 2092–2102.

LI, C. e INGERSOLL, A. P. (2015), Moist convection in hydrogen atmospheres and the frequency of Saturn's giant storms, *Nature Geoscience*, 8: 398-403.

LOPES, R. M. C., et al. (2020). A Global Geomorphologic Map of Saturn's Moon Titan, *Nat. Astron.*, 4: 228–233.

LORENZ, R., e Mitton, J. (2008). *Titan Unveiled: Saturn's Mysterious Moon Explored*. Princeton University Press.

MELTZER, M. (2015). *The Cassini-Huygens Visit to Saturn: An Historic Mission to the Ringed Planet*, Springer.

- PORCO, C. C., et al. (2004). Cassini Imaging Science: Instrument Characteristics and Anticipated Scientific Investigations at Saturn. In C. T. Russel. *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter Remote Sensing Investigations*. Springer.
- PORCO, C., et al. (2014). How the Geysers, Tidal Stresses, and Thermal Emission Across the South Polar Terrain of Enceladus are Related, *The Astronomical Journal*, 148, 45.
- POSTBERG, F., et al. (2018). Plume and Surface Composition of Enceladus. In P. M. Schenk et al., eds. *Enceladus and the Icy Moons of Saturn*. (pp. 129-162). Univ. of Arizona, Tucson.
- SCHENK, P. M., et al. (2018). *Enceladus and the Icy Moons of Saturn*, Arizona LPI.
- SPAHN, F., et al. (2006). Cassini Dust Measurements at Enceladus and Implications for the Origin of the E Ring, *Science* 311, 1416 – 1418.
- SPENCER, J. R., et al. (2006). Cassini Encounters Enceladus: Background and the Discovery of a South Polar Hot Spot, *Science* 311, 1401 – 1405.
- SPIPKER, L. J. (1997). *Passage to a Ringed World*, NASA SP-533, Washington D.C.: NASA.
- SRAMA, R., et al. (2002). The Cassini Cosmic Dust Analyzer. In C. T. Russel. *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter In-Situ Investigations*. Springer.
- STALLARD, T., Lystrup, M., Miller, S. (2008). Emission-line imaging of Saturn's H_3^+ aurora. *Astrophys. J.* 675, L117.
- STONE, E. C., et al. (1981). Voyager 1 Encounter with the Saturnian System, *Science* 212, 159–163.
- TAGGER, M., Henricksen, R. N., Pellat, R. (1991). On the nature of the spokes in Saturn's rings. *Icarus* 91, 297–314.
- TOMASKO, M. G., et al. (1999). The Descent Imager/Spectral Radiometer (DISR) Experiment on the Huygens Entry Probe of Titan. In C. T. Russel. *The Cassini-Huygens Mission: Overview, Objectives and Huygens Instrumentarium*. Springer.
- VAN ALLEN, J. A., et al. (1980). The Energetic Charged Particle Absorption Signature of Mimas, *J. Geophys. Res.* 85(A11), 5709–5718.
- VERBISCER, A. J., et al. (2007). Enceladus: Cosmic Ion and Neutral Mass Spectrometer: Enceladus: Cosmic graffiti artistic caught in the act. *Science*, 315, 815-817.
- VERBISCER A. J., et al. (2009). Saturn's Largest Ring, *Nature* 461, 1098–1100.

WAITE, J. H., et al. (2004). The Cassini Ion and Neutral Mass Spectrometer (INMS) Investigation. In C. T. Russel. *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter In-Situ Investigations*. Springer.

YAROSHENKO, V., Horányi, M., Morfill, G. (2008). The wave mechanism of spoke formation in Saturn's rings. In: *Multifacets of Dusty Plasmas, Fifth Int'l. Conf. Physics of Dusty Plasmas*. *AIP Conf. Proc.* 1041, 215–216.