

Universidade de São Paulo  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
Departamento de Astronomia

Loreany Ferreira de Araújo

**Estudo comparativo da atividade do cometa  
de órbita quase-parabólica C/1977 R1  
(Kohler)**

São Paulo

2020



Loreany Ferreira de Araújo

**Estudo comparativo da atividade do cometa  
de órbita quase-parabólica C/1977 R1  
(Kohler)**

Dissertação apresentada ao Departamento de  
Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica  
e Ciências Atmosféricas da Universidade de  
São Paulo como requisito parcial para a ob-  
tenção do título de Mestre em Ciências.

Versão Corrigida. O original encontra-se dis-  
ponível na Unidade.

Área de Concentração: Astronomia

Orientador: Prof. Dr. Amaury Augusto de  
Almeida

São Paulo

2020



*Dedico este trabalho aos meus pais Elisabeth e José do Carmo (in memoriam), ao meu irmão Renan e aos meus avós Amâncio (in memoriam) e Yolanda (in memoriam), por todo suporte e amor.*



# Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a toda minha família pelo carinho e incentivo. A distância fez com que algumas mudanças tivessem que ser feitas, afastando-nos da rotina e abraçando um novo cotidiano. Minha mãe, Elisabeth, sempre guerreira e atenciosa, é a causadora de minha vontade de seguir. Seu ninho, agora vazio, me deu asas para ir em busca de meus sonhos. Ela se dispôs a ajudar, a acompanhar e a ceder para que nós (eu e meu irmão) pudéssemos escolher o melhor caminho. As necessidades de carinho, de exemplo e de compreensão se devem a ela e ao meu irmão, Renan, sempre companheiro e torcedor, que aguentou barreiras e as pulou e que me encorajou para este mundo de luta. Em especial, relembro meu pai, José, e meus avós, Yolanda e Amancio que, mesmo partindo antes de minha vida adulta, me fizeram acreditar e agradecer, me ajudaram a crescer e desenvolver a sede por um mundo melhor. Sem vocês, nada disso seria possível!

Agradeço, também, ao meu namorado, Pedro. Seu apoio, carinho, atenção, seu modo leve de viver e o amor pela física trouxeram aos meus dias em São Paulo um imenso companheirismo, com o auxílio para aguentar "barras" e superá-las, além de me inspirar a quebrar conceitos e estimular meus questionamentos e a busca pelos desafios da ciência. Agradeço, também, pela assistência na escrita dessa dissertação.

Gostaria, ainda, de agradecer àqueles que foram responsáveis pelo desenvolvimento deste trabalho. Ao meu orientador, Amaury de Almeida, que, como um pai, me recebeu no IAG, fornecendo a base necessária para o desenvolvimento da pesquisa, não deixando de ser atencioso e compreensivo com os desafios de minha vida pessoal. Obrigada por demonstrar tanto amor pelo seu trabalho e, assim, me inspirar durante as diversas conversas que me instigaram a ir atrás de novos aspectos de nossa base científica. Agradeço, também, ao Prof. Gilberto Sanzovo, que acompanhou e forneceu conceitos e técnicas essenciais, sempre

atento aos problemas e dificuldades que poderiam surgir no decorrer da pesquisa, e ao Prof. Roberto Costa, meu relator durante o mestrado, que me auxiliou na busca de estratégias de análises e compartilhou seus conhecimentos sobre a espectroscopia de cometas. Ademais, sou grata ao apoio da Prof<sup>a</sup> Silvia Rossi, responsável pela minha conexão com o Prof. Amaury. Lembro aqui, também, a importante assistência dos funcionários da Astronomia, em especial aos técnicos Marco Antonio, Luis Ricardo e Ulisses, que me salvaram durante os desesperos causados pelo computador.

Sobre os amigos feitos nesta cidade, agradeço, primeiramente, à Alyne Kaaren, por ser a melhor parceira de moradia que eu poderia ter, pelas horas me escutando e me ajudando nas aflições e por ter trazido a Luna e a Sol para alegrar minha vida. Sou grata, também, por todos os colegas do IAG, principalmente aqueles que me auxiliaram durante meus momentos de dificuldade com Python ou com qualquer outro transtorno na pesquisa. Particularmente, agradeço meus companheiros de sala, Carla e Marcelo Vicentin, ao Marcelo Rubinho e a Daiane pelos conselhos e distrações dos marasmos da vida em suas melhores recepções no CRUSP e a Roberta, o Gê e a Catarina pela amizade, principalmente na conjuntura tão difícil que foi o início do curso. Em especial, agradeço ao Jhon e à Stela. Estes não só se tornaram amigos, mas irmãos de coração, parceiros para a vida, que me apoiaram, me acompanharam, me colocaram no colo e me deram puxões de orelha quando foi preciso. Além destes, agradeço ao João e a Giovana que, juntamente com o Pedro, foram presentes nos descansos da escrita desta dissertação e que ampararam ao tirar certos pesos trazidos pela pandemia da COVID-19.

Aos meus amigos do início de minha vida acadêmica, aqueles do curso de Física, do grupo do "Armário", do abacaxi, aqueles que estão comigo sempre, fazendo parte de forma divertida e acolhedora de cada pequena conquista de minha vida: A Mari(ana), o Pablo, o Caio, o Julian, o Henry, a Thais, o Pedro do Valle, o Jhonnatan, o Jesus, o Felipe e o HD. Também, cito, aqui, o Prof. Dr. Moacir Lacerda, orientador de TCC e amigo para a vida, e minha quase irmã, Giovana S., parceira desde a escola e companheira de coração. Obrigada pelo apoio e por estarem sempre facilitando os meus dias!

Por fim, agradeço à CAPES pelo apoio financeiro.

*“Lock up your libraries if you like; but there is no gate, no lock, no bolt that you can set upon the freedom of my mind.”*

Virginia Woolf

*“For me, it is far better to grasp the Universe as it really is than to persist in delusion, however satisfying and reassuring.”*

Carl Sagan



## Resumo

O C/1977 R1 (Kohler) foi o cometa mais brilhante de 1977 (Marsden e Green, 1985), detentor de um período extremamente longo, superior a 100.000 anos e, portanto, considerado o caso de um cometa quase-parabólico. Curiosamente, este objeto não atraiu muita atenção de pesquisadores nos observatórios profissionais. Observações de seu espectro, dispostas na literatura, revelaram a emissão de  $NH$ ,  $CN$ ,  $C_2$  e, possivelmente, de  $C_3$ , mas nenhuma emissão de  $OH$ ,  $CN$ ,  $NH_2$  ou  $CO^+$ . O contínuo era muito fraco, o que significa que o cometa tem a produção de poeira consideravelmente esgotada. Nesta dissertação, deduzimos semi-empiricamente, utilizando o método descrito por de Almeida et al. (1997), taxas de produção de água e hidroxila, a partir das observações fotométricas obtidas da plataforma COBS. Nossos resultados são consistentes com aqueles obtidos a partir de observações do radical  $OH$  em  $\lambda = 18 \text{ cm}$  (Crovisier et al., 1981; Despois et al., 1981) e um conjunto concentrado de sete observações realizadas por A'Hearn et al. (1995), em seu trabalho clássico sobre fotometria de banda estreita em cometas. Determinamos as taxas de liberação de água e concluímos que o cometa possui um raio efetivo da ordem de  $3,0(\pm 1,5) \text{ km}$  e um raio nuclear mínimo de  $0,9(\pm 0,45) \text{ km}$ . Uma fração de área mínima da superfície ativa da ordem de 10 -11% (em relação ao periélio) no hemisfério iluminado pelo Sol justifica a taxa de produção de água resultante da sublimação no núcleo do cometa. Como forma de expandir a análise, outros 14 cometas jovens e de longo período, analisados por Combi et al. (2019), foram incluídos, tendo suas taxas de produção de água comparadas com aquelas do cometa Kohler.



# Abstract

The C/1977 R1 (Kohler) was considered the brightest comet of 1977 (Marsden e Green, 1985), with an extremely long period of over 100,000 years and is therefore considered as the case of a nearly parabolic comet. Curiously, the comet did not attract much attention from professional observatories. The observed spectrum revealed emission from  $NH$ ,  $CN$ ,  $C_2$  and possibly  $C_3$ , but no emission was detected from  $OH$ ,  $CH$ ,  $NH_2$  or  $CO^+$ . The continuum was very weak implying that the comet is considerably depleted in dust production. In this dissertation we deduce semi-empirically, using the method described by de Almeida et al. (1997) water and hydroxyl production rates from the photometric observations taken from COBS. Our results are consistent with the ones obtained from observations of the  $OH$  radical at  $\lambda = 18 \text{ cm}$  (Crovisier et al., 1981; Despois et al., 1981), and a compact set of seven observations performed by A'Hearn et al. (1995), in their classic work of narrow band photometry on 85 comets. We determine water release rates and came to the conclusion that the comet has an effective radius of the order of  $3,0(\pm 1, 5) \text{ km}$  and a minimum nuclear radius of  $\sim 0,9(\pm 0, 45) \text{ km}$ . A fraction of minimum active surface area of the order of 10-11% on the sunlit hemisphere, is necessary to explain the rate of water production sublimated by the nucleus of the comet. In addition, these rates were compared with that of the compounds present in the comet spectrum, with results that led to the classification of it as depleted in carbon, disagreeing with preliminary studies by A'Hearn et al. (1995). As an expansion of the analysis, 14 other young and long-term comets, analyzed by Combi et al. (2019), were included, with their water production rates compared to those of comet Kohler.



# Lista de Figuras

1	Imagem do Cometa Kohler (C/1977 R1) obtida por Merlin Kohler em 31 de outubro de 1977. . . . .	22
2	Espectro do cometa Kohler obtido no Observatório Abrahão de Moraes . .	23
1.1	Processos cometários esquematizados . . . . .	29
1.2	Formação gradual das caudas de gás do cometa. . . . .	33
1.3	Atividade cíclica cometária de acordo com a órbita. . . . .	34
3.1	Elementos orbitais do cometa Kohler e sua representação gráfica. . . . .	47
3.2	A órbita quase-parabólica do cometa Kohler. . . . .	49
3.3	Distribuição das magnitudes da base de dados, adquiridas por observações utilizando telescópios refratores e refletores, com a distância heliocêntrica. .	50
3.4	Variação de magnitude definida para o cometa Kohler na fase pré-periélica.	51
3.5	Variação de magnitude definida para o cometa Kohler na fase pós-periélica.	52
3.6	Magnitudes corrigidas e sua distribuição com a distância heliocêntrica do cometa (fase-pré). . . . .	53
3.7	Magnitudes corrigidas e sua distribuição com a distância heliocêntrica do cometa (fase-pós). . . . .	54
3.8	Comportamento das taxas de produção de água com a razão $r/q$ , onde $q = 0,951 ua$ , durante a fase pré-periélica. . . . .	55
3.9	Comportamento das taxas de produção de água com a razão $r/q$ , onde $q = 0,951 ua$ , durante a fase pós-periélica. . . . .	56
3.10	Comportamento da taxa de produção de hidroxila com a relação entre as distâncias heliocêntrica e periélica (fase-pré). . . . .	58

3.11	Comportamento da taxa de produção de hidroxila com a relação entre as distâncias heliocêntrica e periélica (fase-pós).	59
3.12	Relação entre a taxa de produção de hidroxila e a magnitude visual absoluta, comparando com resultados de observações feitas na faixa de rádio do espectro.	60
3.13	Relação entre a taxa de produção total para os gases e os dias para a fase pré-periélica.	61
3.14	Relação entre a taxa de produção total para os gases e os dias para a fase pós-periélica.	62
3.15	Determinando a área ativa do cometa com sua aproximação e afastamento do Sol.	64
3.16	Estimativa dos raios nucleares mínimo e efetivo.	65
4.1	A variação da taxa de produção de água com a distância heliocêntrica e a comparação entre cometas jovens e de longo período (YL) (Combi et al., 2019) e o C/1977 R1 (Kohler).	74
A.1	Variação temporal da magnitude visual do Cometa Wirtanen para diferentes passagens - fase pré.	89
A.2	Variação temporal da magnitude absoluta do Cometa Wirtanen para diferentes passagens - fase pós.	90
A.3	Variação da taxa de produção de água com a distância heliocêntrica do cometa Wirtanen para diferentes passagens - fase pré.	91
A.4	Variação da taxa de produção de água com a distância heliocêntrica do cometa Wirtanen para diferentes passagens - fase pós.	91
A.5	O comportamento da taxa de produção de água para o cometa Wirtanen na passagem de 1986.	93
A.6	O comportamento da taxa de produção de água para o cometa Wirtanen na passagem de 1991.	94
A.7	O comportamento da taxa de produção de água para o cometa Wirtanen na passagem de 1997.	95
A.8	O comportamento da taxa de produção de água para o cometa Wirtanen na passagem de 2002.	96

A.9	O comportamento da taxa de produção de água para o cometa Wirtanen na passagem de 2008. . . . .	97
A.10	O comportamento da taxa de produção de água para o cometa Wirtanen na passagem de 2018. . . . .	98
A.11	Variação do raio nuclear do cometa Wirtanen para diferentes passagens. . .	100
B.1	Análise modelada para dados sintéticos - Método TRM e comparações. . .	104
C.1	A variação da taxa de produção de água com a distância heliocêntrica e a comparação entre cometas velhos e de longo período (OL) (Combi et al., 2019) e o C/1977 R1 (Kohler). . . . .	105
C.2	A variação da taxa de produção de água com a distância heliocêntrica e a comparação entre cometas jovens e de longo período (YL) (Combi et al., 2019) e o C/1977 R1 (Kohler). . . . .	106
C.3	A variação da taxa de produção de água com a distância heliocêntrica e a comparação entre cometas dinamicamente novos (DN) (Combi et al., 2019) e o C/1977 R1 (Kohler). . . . .	107
C.4	A variação da taxa de produção de água com a distância heliocêntrica e a comparação entre cometas analisados por Combi et al. (2019) e o C/1977 R1 (Kohler). . . . .	108



# Lista de Tabelas

3.1	Quantidade de observações realizadas para o cometa Kohler durante suas fases pré e pós periélicas utilizando telescópios refratores e refletores. . . .	48
3.2	Bandas moleculares presentes no espectro do cometa Kohler, no dia 17 de novembro de 1977, e seus respectivos valores de interesse. . . . .	67
4.1	As taxas de produção de água nas fases pré e pós periélicas de 14 cometas jovens e de longo período obtidas por <a href="#">Combi et al. (2019)</a> . . . . .	72
A.1	Elementos orbitais do cometa 46P/Wirtanen. . . . .	87
A.2	Dados observacionais para o Comet 46P/Wirtanen. . . . .	88



# Sumário

<i>Introdução</i> . . . . .	21
<i>1. Conceitos Fundamentais</i> . . . . .	27
1.1 Classes dinâmicas . . . . .	27
1.2 Estrutura e composição . . . . .	29
1.2.1 Núcleo . . . . .	30
1.2.2 Coma . . . . .	31
1.2.3 Cauda . . . . .	32
<i>2. Modelos Teóricos: Estimando taxas de produção de água</i> . . . . .	35
2.1 Modelo de Haser . . . . .	35
2.2 Método da fotodissociação da água . . . . .	36
2.3 Método das Abundâncias Fracionais Médias ou Típicas . . . . .	36
2.4 Método Semi-Empírico de Magnitudes Visuais (MSEMV) . . . . .	37
2.5 Modelo de vaporização da água e a dimensão nuclear . . . . .	43
2.6 A grade computacional . . . . .	45
<i>3. O cometa Kohler</i> . . . . .	47
3.1 Base de dados . . . . .	48
3.1.1 Eficiência dos dados . . . . .	49
3.2 Relações para as magnitudes visuais . . . . .	50
3.3 Taxas de produção e suas consequências . . . . .	55
3.3.1 Água . . . . .	55
3.3.2 Hidroxila . . . . .	57

3.3.3	Taxa de produção de gás . . . . .	61
3.3.4	Determinação do raio nuclear . . . . .	63
3.4	Comparando as taxas de produção das espécies químicas presentes no espectro do cometa . . . . .	65
3.4.1	Análise do espectro . . . . .	67
4.	<i>Comparação dos resultados obtidos com uma amostra de cometas observada pelo satélite SOHO/SWAN</i> . . . . .	71
4.1	Descrição da amostra escolhida . . . . .	71
4.2	Análise da produtividade dos cometas e a comparação com o cometa Kohler . . . . .	73
5.	<i>Conclusões e perspectivas</i> . . . . .	75
	<i>Referências</i> . . . . .	79
	<i>Apêndice</i> . . . . .	85
A.	<i>O Cometa Wirtanen</i> . . . . .	87
A.1	Curva de Luz . . . . .	88
A.2	As taxas de produção de água e suas variações com a hiperatividade do cometa . . . . .	90
A.2.1	Detecção de <i>outbursts</i> . . . . .	92
A.3	Determinação do raio nuclear . . . . .	100
B.	<i>Time-Resolved Model (TRM)</i> . . . . .	103
C.	<i>Cometas de longo período e dinamicamente novos - Uma comparação com o C/1977 R1 (Kohler)</i> . . . . .	105

# Introdução

Algumas das principais questões a serem respondidas ao se tratar de objetos astrofísicos se referem às suas origens. Assim, é de grande interesse compreendermos como se deu o surgimento de nosso Sistema Solar, elucidando indagações importantes de nossa história e expandindo-as em discussões para outros sistemas estelares.

Há cerca de 4,6 bilhões de anos, a contração gravitacional de uma nuvem interestelar composta por gás e poeira, a Nebulosa Solar Primitiva, deu origem ao Sistema Solar. Primeiramente, o superaquecimento da região mais massiva da nuvem (a parte central), deu início ao processo de formação de nossa estrela, o Sol e, ao seu redor, o disco protoplanetário, uma região de menor densidade. A tensão de cisalhamento turbulento e os gradientes de pressão do gás neste disco requereram processos de coagulação colisionais para dar origem aos planetesimais. Tais processos, conduzidos por movimentos diferenciais devido à força de arrasto do gás, induziram velocidade para as partículas durante a colisão e, ao diminuir suas velocidades de colisão, permitiram o agrupamento de matéria em diferentes faixas do disco, resultando na formação de planetas, satélites naturais e pequenos corpos, tais como cometas e asteróides ([Weidenschilling, 1997](#)).

Em cometas, são encontrados compostos químicos característicos da química solar, tais como carbono, nitrogênio e oxigênio, além de elementos orgânicos de abundâncias similares às daquelas do material encontrado em nuvens moleculares e regiões de formação estelar. Seus pequenos tamanhos e órbitas de grandes excentricidade ( $e$ ) e inclinação ( $i$ ), são indicativos de que eles não sofreram perdas significativas de matéria com o tempo, sendo, então, os objetos primitivos que mais guardam informações de sua origem e evolução. Portanto, podem ser considerados fósseis do Sistema Solar, e, assim, demonstra-se a importância do estudo da evolução físico-química desses objetos como forma de entender como surgiu o

nosso Sistema e outros similares.

Neste trabalho, o objeto alvo de estudo é um cometa de longo período e órbita quase-parabólica ( $e \sim 1$ ), com um período de, aproximadamente, 100.000 anos, o C/1977 R1 (Kohler). Ele foi descoberto em 4 de setembro de 1977, pelo astrônomo amador Merlin Kohler, em Quincy, Califórnia (EUA), utilizando um telescópio do tipo Schmidt-Cassegrain de 20 *cm* de abertura e uma ocular de 70x de aumento. A observação indica a presença de uma coma com aparência difusa e a nítida presença de uma condensação central, como pode ser visto na Fig. 1. Em 6 de setembro de 1977, E.A. Harlan, independentemente, o observou utilizando um astrógrafo duplo de 51 *cm*, no Lick Observatory (*IAU 3103*), confirmando, assim, sua descoberta (Hendrie e Keitch, 1981).



Figura 1: Imagem do Cometa Kohler (C/1977 R1) obtida por Merlin Kohler em 31 de outubro de 1977.

Sete dias depois de sua passagem periélica (o ponto mais próximo do Sol), que ocorreu no dia 10 de novembro de 1977, o espectro do cometa Kohler foi obtido no Observatório

Abrahão de Moraes (OAM), da Universidade de São Paulo (USP), em Valinhos, SP, utilizando o telescópio Boller & Chivens, de 0,61 m de abertura e um *Optical Multichannel Analyser* (OMA), de 500 canais, com uma fenda de largura 2.8'' e 4'0 de comprimento, centrada na coma do cometa, tendo, assim, uma resolução na região espectral considerada (3555 a 4104 Å) de  $\sim 1,1\text{Å}/\text{canal}$ . Durante as observações, as distâncias heliocêntrica e geocêntrica eram de cerca de 1,000 e 0,951 *ua*, respectivamente. Para se obter o fluxo absoluto, o sistema foi calibrado através da observação da estrela gama Gem (HR2421) (Hayes, 1970). Os resultados estão indicados na Fig. 2, onde pode ser vista a detecção da intensa banda de *CN* (0-0), em 3883 Å e a sobreposição de *CN* (1-1), em 3871 Å, *CH* (0-0), em 3889 Å, *C*<sub>2</sub> (0-0), em 3852 Å e *C*<sub>3</sub>, em 3914,5 Å, concordando com as observações de McCracken et al. (1977).

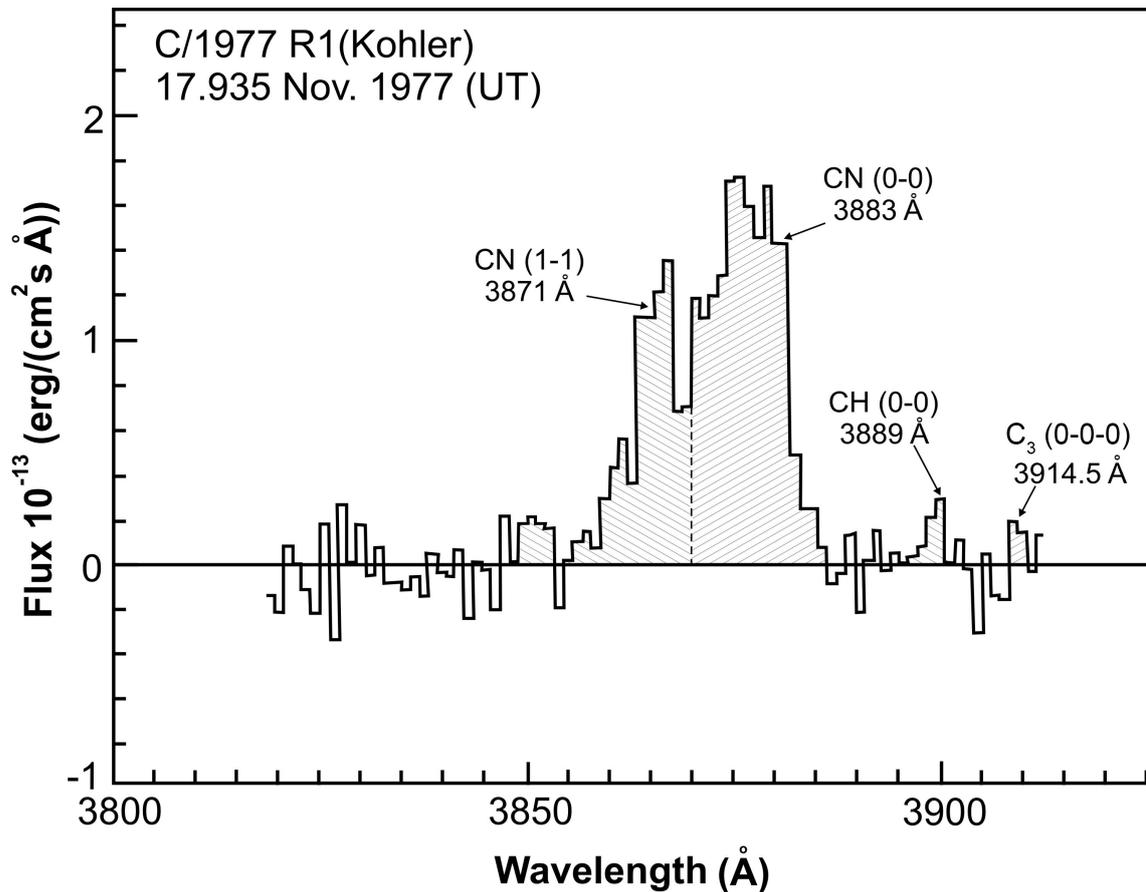


Figura 2: Espectro do cometa Kohler obtido no Observatório Abrahão de Moraes, em Valinhos, SP.

Embora tenha sido o cometa mais brilhante de 1977, há poucos resultados observacionais associados à produtividade do cometa Kohler. Destacamos, aqui, o conjunto de 7 observações (condensadas) realizadas por A'Hearn et al. (1995) em seu célebre trabalho de

fotometria de banda estreita com 85 cometas. Neste, a taxa máxima de produção de água no periélio foi estimada e algumas abundâncias fracionais obtidas. O cometa foi classificado como sendo um objeto jovem, de longo-período, apresentando uma abundância típica (ver seção 3.4). Além deste trabalho, há, no domínio de rádio, observações realizadas por [Crovisier et al. \(1981\)](#) e [Despois et al. \(1981\)](#), onde as taxas de produção do radical hidroxila (OH), um dos subprodutos da fotodissociação da água em cometas, foram detectadas.

Nesta dissertação, o principal objetivo é o cálculo da produtividade do Cometa Kohler. Para isso, dispomos de um conjunto, relativamente amplo, de magnitudes visuais do cometa, obtido a partir de observações sistemáticas, disponibilizadas nas bibliotecas das associações ICQ (*International Comet Quarterly*), BAA (Reino Unido), ALPO (EUA), DCV/NKV (Países Baixos), REA (Brasil) e VdS (Alemanha), e encontradas na plataforma COBS<sup>1</sup> (*Comet Observation Database*). Esse conjunto de observações foi útil para que pudéssemos obter e analisar o comportamento das taxas de produção de água (em moléculas/s) durante aquela passagem periélica do Kohler. Com isso em mente, aplicamos o Método Semi-Empírico de Magnitudes Visuais (*MSEMV*), que têm se mostrado, ao longo do tempo, uma ferramenta eficiente e robusta no cálculo dessas taxas ([de Almeida et al., 1997](#); [Sanzovo et al., 2001](#); [de Almeida et al., 2007](#)).

A composição química gasosa do cometa não é exatamente conhecida na literatura, o que torna uma tarefa delicada a estimativa da taxa de perda de gás (em g/s). Em vista da falta de mais informações, optamos por adotar uma composição em que 90% é água e 10% é constituída de outras espécies moleculares mais pesadas, com cerca de 44 *Da*. Essa composição gasosa foi escrita em termos das taxas de produção da água (em moléculas/s) e fornecidas pelo *MSEMV* (ver Capítulo 2). Do mesmo modo, utilizamos do fato de que a hidroxila é um dos subprodutos da fotodissociação da água para estimativa das taxas de produção desse radical. Os cálculos de áreas ativas e da dimensão (mínima e efetiva) do núcleo do cometa também são apresentados neste trabalho, incorporando à equação do balanço radiativo do Cometa Kohler um modelo simples de vaporização da água, com calores latentes e pressão de sublimação fornecidos por [Murphy e Koop \(2005\)](#).

Como forma de confirmar a validade do *MSEMV*, verificar a classificação do cometa Kohler e realizar um estudo evolutivo de uma das classes dinâmicas cometárias, foram utilizadas as taxas de produção de água obtidas por [Combi et al. \(2019\)](#) para 14 cometas

---

<sup>1</sup> <https://www.cobs.si/>.

jovens e de longo período, observados com a câmera SWAN (*Solar Wind Anisotropies*), no satélite SOHO (*SOlar and Heliospheric Observatory*), tornando possível um amplo estudo referente à evolução das taxas de produção em si.

Este trabalho está dividido em 5 capítulos: o primeiro, mostra os fundamentos do estudo de cometas, como suas características físicas e químicas e as diversas classes dinâmicas. No segundo capítulo, serão apresentados os modelos/métodos utilizados para a realização desta pesquisa, dando destaque ao *MSEMV*. Todos os resultados obtidos, decorrentes da aplicação deste modelo para o cometa Kohler, aparecem no Capítulo 3, incluindo uma análise do espectro mostrado na Figura 1, com base na aplicação de um modelo de Haser simplificado. Já no Capítulo 4, estarão expostas as comparações com aqueles cometas analisados por Combi et al. (2019), incluindo a apresentação das taxas de produção de água, além da análise crítica correlacionada à classe dinâmica dos cometas jovens e de longo período. Por fim, no Capítulo 5, serão sumarizados os resultados obtidos neste estudo.



## Conceitos Fundamentais

Neste capítulo, apresentaremos alguns importantes conceitos associados ao estudo de cometas. Daremos enfoque para as características fundamentais, tais como sua composição e seus processos físicos e químicos internos.

### 1.1 Classes dinâmicas

Naturalmente, é de se imaginar que, por estarem relativamente próximos de nós, conseguimos identificar os cometas com detalhes, porém, alguns fatores como a perturbação de suas órbitas por interações gravitacionais com corpos maiores, como por exemplo Júpiter, e sua extensa coma dificultam sua caracterização.

As classes dinâmicas cometárias são definidas de acordo com suas posições de origem. Em 1950, Jan Hendrik Oort, investigando o comportamento de 19 cometas de órbitas excêntricas, indicou a possível presença de uma nuvem cometária nos extremos do Sistema Solar, a Nuvem de Oort, à distâncias entre 40000 e 100000 *ua* do Sol, com massa de cerca de  $10^{25}$  *kg* (Oort et al., 1950). Pesquisas mais recentes indicam a nuvem com uma extensão de 2000 a 200000 *ua*, sendo subdividida em regiões interna (de 2000 a 5000 *ua*) e externa (100000 e 200000 *ua*).

A partir da perturbação gravitacional causada por material galático externo, estrelas mais próximas ou por grandes nuvens moleculares do meio interestelar (em menor escala), alguns cometas escapam da região de estabilidade e são arremessados, se aproximando do Sol (momento em que conseguimos observar sua atividade). Tais objetos possuem órbitas de grandes períodos ( $P > 200$  anos) e excentricidades ( $e \approx 1$ ), caracterizando os denominados cometas de longo período.

Em 1951, [Kuiper \(1951\)](#), analisando o comportamento ressonante entre Urano e Netuno, supôs a presença de um cinturão de pequenos corpos, remanescentes da formação destes corpos maiores. Isto foi confirmado por [Ip e Fernandez \(1997\)](#). Corpos originados desta região sofrem forte influência gravitacional de Júpiter e podem ter suas órbitas evoluídas para a denominada Família de Halley, composta por objetos de órbitas parecidas com a do cometa 1P/Halley, e períodos de  $20 < P < 200$  anos. Com menores inclinações em relação ao plano da eclíptica, também podemos encontrar cometas da Família de Júpiter, de períodos  $P < 20$  anos. Estes são os cometas de curto período, detentores de pequenas excentricidades, indicando, então, órbitas elípticas.

[Carussi e Valsecchi \(1987\)](#) propuseram uma classificação mais formal para diferenciar as duas famílias de cometas. Ela se baseia no parâmetro de Tisserand, estimado a partir do estudo de órbitas perturbativas causadas pela presença de dois corpos maiores. Este é definido por:

$$T_J = \frac{a_J}{a_0} + 2\sqrt{\frac{a_0}{a_J}(1 - e^2)\cos(i)}, \quad (1.1)$$

com  $a_J$  sendo o semi-eixo maior de Júpiter.

A partir da análise de 86 cometas, observados entre os anos de 1976 e 1992, [A'Hearn et al. \(1995\)](#) resumiram a classificação dos cometas investigados de acordo com o semi-eixo maior original ( $a_0$ ) de suas órbitas. Ela se dá da seguinte maneira:

- Dinamicamente novos (*Dynamically new*, DN): com  $a_0 > 20000$  ua e  $1/a_0 < 50 \times 10^{-6}$  ua<sup>-1</sup>;
- Jovens de longo período (*Young Long period*, YL): com  $20000$  ua  $> a_0 > 500$  ua e  $50 \times 10^{-6}$  ua<sup>-1</sup>  $< 1/a_0 < 2000 \times 10^{-6}$  ua<sup>-1</sup>;
- Velhos de longo período (*Old Long period*, OL): com  $a_0 < 500$  ua e  $1/a_0 > 2000 \times 10^{-6}$  ua<sup>-1</sup>;
- Família de Júpiter (*Jupiter Family*, JF): com  $2,0 < T_J < 3,0$ ;
- Família de Halley (*Halley Family*, HF): com  $T_J > 2,0$ ,

Foi observado que o número de cometas que retornam à distâncias pequenas do Sol é muito menor do que o proposto por modelos dinâmicos. Isso pode estar ocorrendo devido

aos estresses térmicos causados por efeitos sazonais, impactos com outros pequenos corpos e, por consequência, perda de todos (ou quase todos) os seus voláteis (Dones et al., 2004).

## 1.2 Estrutura e composição

Apesar da alta atividade luminosa, visível muitas vezes a olho nu, cometas possuem uma estrutura relativamente complexa e pouco conhecida ou definida até o início das medidas *in situ*, com o envio de espectrógrafos de alta resolução a bordo das naves Giotto (ESA), Suisei e Sakigake (Japão) e Vega 1 e 2 (URSS e França), em 1986, para observação do cometa Halley. Nestas, foi estimado um núcleo de tamanho 15 x 15 x 8 km com uma superfície escura, de albedo muito baixo, de cerca de 0,04, indicando uma composição rica em carbono. Também, foram detectadas, pela primeira vez, as partículas *CHON* (Carbono, Hidrogênio, Oxigênio e Nitrogênio), os elementos biogênicos da química prebiótica, essenciais para o sistema de vida que conhecemos.

A partir do efeito gravitacional e da pressão de radiação solar sobre um cometa, processos químicos e físicos são observados, resultando na formação das caudas e da coma destes objetos, como pode ser visto na Figura 1.1.

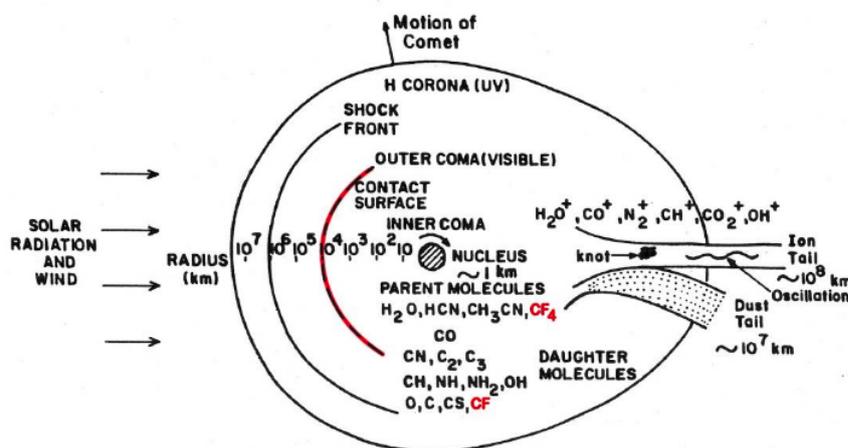


Figura 1.1: Processos cometários esquematizados (Imagem retirada de de Almeida et al. (2019) e adaptada de Swamy (2010)).

Deste modo, indicaremos alguns aspectos da atividade cometária, iniciando com o seu componente principal, o núcleo.

### 1.2.1 Núcleo

Por ser um corpo em rotação, composto por gelos e partículas de poeira, o núcleo cometário desencadeia as reações observadas no objeto a partir da sublimação de seu material. Estima-se, em média, que sua dimensão varie de 1 a 20 *km*, de cometa a cometa.

Em 1950, foi proposto um modelo para a estrutura do núcleo cometário, com este sendo representado por uma grande “bola de neve suja”, ou seja, um corpo de gelo e grãos sólidos (a poeira) (Whipple, 1985). No modelo elaborado por Delsemme e Swings (1952) para o núcleo, algumas moléculas de hidrocloratos podem estar presentes na composição. Porém, gelo puro de *CO* já foi observado em cometas e a estrutura cristalina requerida para a água, na verdade, se condensaria como gelo amorfo.

A fragmentação observada em alguns corpos, como o que houve em 1993 com a aproximação do cometa Shoemaker-Levy 9 a Júpiter, foi um indicativo para a estruturação de um núcleo poroso, no qual grãos de poeira se agregariam a uma mistura de gases solidificados. Porém, isso não foi visto na missão para o cometa Halley em 1986, como dito anteriormente. Tal erosão da superfície depende diretamente do estado físico em que o objeto se encontra. Cometas jovens (de classes DN, YL e OL) tendem a conter um manto de material pouco danificado, com uma maior força de tensão superficial durante a interação gravitacional solar, o que conserva a sua estrutura. Já cometas JF, por exemplo, sofrem fortes gradientes térmicos ou pressões voláteis, tendendo à aquecer mais lentamente e a serem mais porosos (Combi et al., 2013).

A atividade cometária depende de quão distante o cometa está do Sol (distância heliocêntrica,  $r_h$ ) e de como se dá a penetração das ondas de calor à diferentes profundidades. O material passa a aquecer e, a cerca de  $r_h = 10 \text{ ua}$ , já se pode observar a sublimação dos materiais mais voláteis, como o *CO* ( $T_{\text{sublimação}} \sim 24 \text{ K}$ ), molécula mais abundante depois da água. A partir daí, outros compostos iniciam este processo, tal como o *CO*<sub>2</sub> ( $T_{\text{sublimação}} \sim 72 \text{ K}$ ) e, finalmente, o mais abundante deles, a água ( $T_{\text{sublimação}} \sim 152 \text{ K}$ ). Todo esse processo de sublimação é fracionado (como pode ser notado pelas diferentes escalas de tempo das espécies moleculares) e a quantidade do material sublimado depende de quão ativa está a superfície cometária. Em regime de rotação rápida (quando o período de rotação do próprio eixo é muito pequeno), a fração de área ativa pode chegar a quase 100%.

### 1.2.2 Coma

A ejeção de gases do núcleo cometário se inicia com a sublimação destes. Microscopicamente o que ocorre são os processos de fotodissociação e fotoionização das moléculas originais do núcleo, as moléculas Mãe. Como resultado, ocorre a formação das moléculas Filhas, fotoionizadas (no caso da cauda) ou não (fotodissociação), com determinadas velocidades de ejeção e tempos de vida característicos.

O processo de fotodissociação se resume em:



onde  $xyz$  representa a molécula mãe e  $xy$  e  $z$  suas moléculas filhas resultantes.

O que vemos nesta equação é a absorção da energia de um fóton da radiação solar por uma molécula mãe estável, resultando na dissociação desta quando a energia de dissociação é atingida (soma dos estados eletrônicos, vibracionais e rotacionais da molécula), formando, então, dois novos compostos.

Para a fotoionização, temos:



Aqui, o fóton de energia absorvido pela molécula resultará na emissão do elétron de valência (aquele com menor ligação ao núcleo do átomo), ionizando-a, então.

A figura 1.1 sumariza em detalhes a atividade cometária, indicando as principais moléculas filhas resultantes dos compostos de maior quantidade no núcleo cometário ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ). Quando a distância periélica é muito pequena, as taxas de produção das moléculas filhas são muito altas. No caso da água, seu tempo de vida de dissociação é muito curto (de cerca de 1 h) e a maioria das partículas dissociadas na coma interna (região de até  $10^4$  km do núcleo) são altamente colisionais. Assim, os átomos de hidrogênio são desacelerados com o aquecimento fotoquímico da coma ao colidir com elementos mais pesados, ou seja, eles perdem momento para estes, que adquirem altas velocidades de ejeção, muito maiores que 1 km/s. Portanto, o gás tende a aquecer muito mais do que consegue esfriar com a fotodissociação e se expande adiabaticamente, formando a conhecida coma cometária, constituída pela zona de choque frontal, área com a qual a radiação e o vento solar irão interagir (Combi et al., 2011).

Como é de principal interesse estimar as taxas de produção das moléculas presentes na coma, devemos nos atentar às facilidades do método. Devido a presença das bandas telúricas nos espectros dos objetos observados (opacidade provocada, principalmente, pelo vapor d'água presente na atmosfera), em algumas faixas do infravermelho e de comprimentos de onda milimétricos, muitas vezes a visualização da emissão das moléculas mãe são dificultadas (como para a água, por exemplo, que não possui uma banda óptica). Assim, relacionando as taxas de produção das moléculas filhas (mais fáceis de serem observadas) com as das moléculas mães, é possível obter os resultados de interesse.

### 1.2.3 Cauda

Atuando como um obstáculo para a passagem do vento solar, o cometa tende a deformar as linhas de campo magnético do plasma incidido sobre ele. O que ocorre são processos como *charge-exchange*, no qual temos a troca de cargas entre os prótons do vento e as moléculas do cometa (ionizando-as), juntamente com o próprio processo de fotoionização, já exposto neste texto, e a transferência de elétrons energéticos.

Partículas internas do cometa tendem a se movimentar helicoidalmente em torno das linhas de força do campo, resultando, então, no arrasto das moléculas ionizadas pelo vento solar e formando, assim, as caudas de gás do cometa, retilíneas e na direção oposta ao Sol, como indicado, gradualmente, na figura 1.2. Em regiões de descontinuidade entre o plasma e a magnetosfera cometária, o fluxo de íons é bastante turbulento devido à termalização incompleta causada pelos grandes livres caminhos médios, assim, a dinâmica é mais complexa do que se imagina ([Biermann et al., 1967](#)).

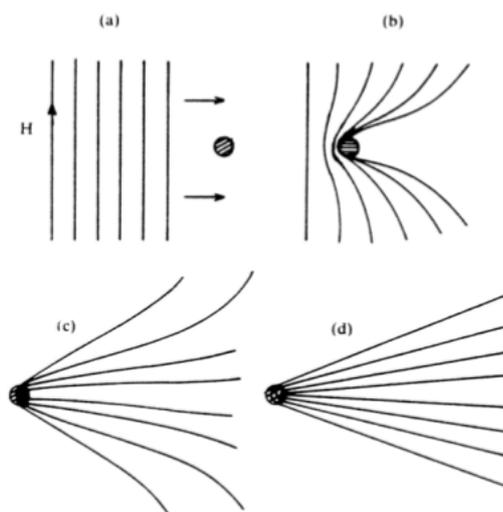


Figura 1.2: Formação gradual das caudas de gás do cometa a partir da deformação das linhas de campo magnético do meio interestelar (Swamy, 2010).

A cauda de gás mais visível de um cometa é resultado da ionização de  $CO$  ( $CO^+$ ). Ela possui uma cor azulada e pode chegar até 15 *ua*. Além desta, também podemos considerar a cauda de  $H_2O^+$ , menos aparente devido a sua cor avermelhada.

Foi observando o comportamento das caudas de gás cometárias que, em 1947, [Alfvén e Lindblad](#) analisaram a magnetodinâmica das ondas emitidas pela coroa solar. Dali, pela primeira vez, foi imaginada a presença dos ventos solares no meio interestelar, com o plasma agindo como um fluido dinâmico. Assim, torna-se importante entender como se dão as deformações das linhas de campo magnético ao redor da ionosfera cometária.

Além da cauda de gás, devemos destacar o desenvolvimento da cauda de poeira. Esta se dá a partir do efeito da ação mútua gravitacional do material solar com os grãos do núcleo e da coma cometários. Sua forma curvada depende de quão longe o objeto está da Terra e do Sol, ou seja, é o campo gravitacional que vai determinar seu estado. Seu tamanho pode se estender a milhares quilômetros de distância do núcleo cometário.

Desta maneira, resumimos todos os processos citados de acordo com a atividade cíclica do cometa, como apresentado na figura 1.3. Nesta, muito próximo do Sol, destaca-se a possível fragmentação dos objetos, principalmente daqueles denominados cometas rasantes.

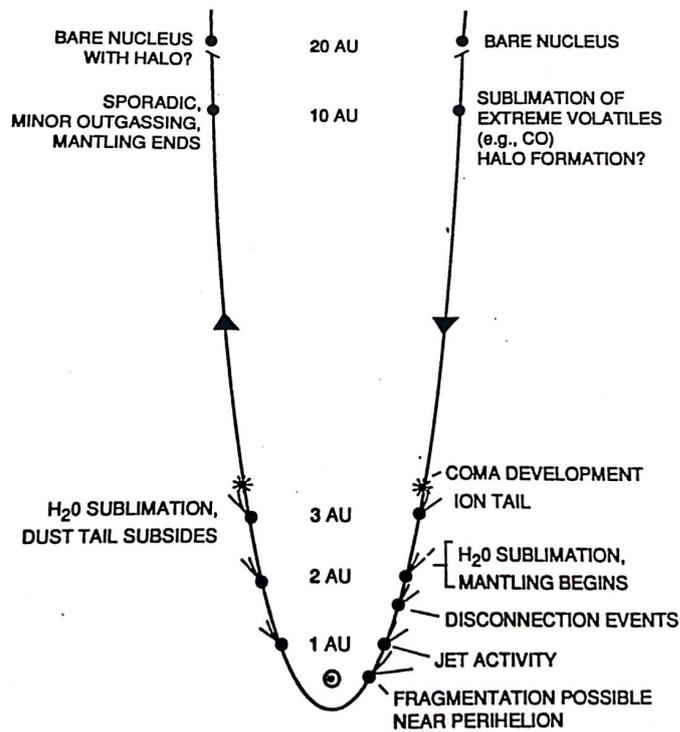


Figura 1.3: Atividade cíclica cometária de acordo com a órbita. (Adaptado de Stern et al. (1990)).

Procuramos, neste capítulo, resumir alguns aspectos conceituais importantes que fazem parte da descrição da estrutura cometária. No próximo capítulo, descreveremos os principais modelos e métodos existentes na literatura que auxiliam no cálculo das taxas de produção das espécies moleculares, dando destaque ao método aqui utilizado.

## Modelos Teóricos: Estimando taxas de produção de água

Para entender o comportamento da coma, citado no capítulo anterior, se faz necessária a construção de modelos para interpretação dos produtos resultantes dos processos descritos. Isto pode ser feito estimando as taxas de produção das moléculas filhas, provindas dos principais compostos dos cometas, e relacionando-as com a distância heliocêntrica em que o cometa se encontra e com suas classes dinâmicas, levando em conta suas variações de acordo com o formato do núcleo, a orientação do eixo de spin, a distribuição de atividades na superfície do cometa, entre outros fatores.

Há, na literatura, vários modelos ou métodos utilizados para o cálculo das taxas de produção da água e do gás em cometas. Os mais conhecidos são o Modelo de Haser, o Método da Foto-dissociação da Água e o Método das Abundâncias Fracionais Médias ou Típicas.

### 2.1 *Modelo de Haser*

O Modelo de Haser é um modelo clássico. Nele, pressupõe-se que algumas espécies moleculares genitoras fluem isotropicamente através de um núcleo esférico ao longo de uma escala de comprimento  $l_p$  (em  $km$ ) antes de se fotodissociarem em espécies moleculares filhas. Estas percorrem na coma uma escala de comprimento  $l_r$  (em  $km$ ) sendo, dessa forma, seus fluxos detectados e analisados. Para a sua aplicação, o modelo necessita, portanto, da perfeita compreensão das taxas de fotodissociação das espécies moleculares envolvidas, bem como o conhecimento atualizado das escalas de comprimento ao longo do núcleo e da coma.

## 2.2 Método da fotodissociação da água

A equação 1.2 pode ser reescrita para o principal caso a ser tratado neste trabalho, a fotodissociação da água. Temos, assim, a seguinte reação:



que, em cometas processa-se com eficiência de 85% (Huebner et al., 1992). Deste modo, se é conhecida a taxa de produção do radical hidroxila de um determinado cometa, obtida, por exemplo, através do Modelo de Haser, a taxa de produção da água (em moléculas/s) será facilmente deduzida a partir da relação:

$$Q(H_2O) \approx 1,1 \cdot Q(OH). \quad (2.2)$$

## 2.3 Método das Abundâncias Fracionais Médias ou Típicas

Pesquisas pioneiras de diversos pesquisadores durante os anos 1980, tais como Cochran (1987), Schleicher et al. (1987) e Osip et al. (1992) forneceram informações para aplicação do método onde as taxas de produção de água podem ser obtidas a partir das taxas de produção média (ou típicas) de outras espécies moleculares observadas, tais como os radicais hidroxila ( $OH$ ), carbeto ( $C_2$ ), carbono 3 ( $C_3$ ), imidogênio ( $NH$ ) e o cianogênio ( $CN$ ). Por exemplo, para um cometa de curto-período, como é o caso do 2P/Encke, foram obtidas as seguintes abundâncias fracionais médias, baseadas em observações realizadas a partir do solo (Osip et al., 1992):

$$\frac{Q(OH)}{Q(CN)} = 650 \pm 240, \quad (2.3)$$

$$\frac{Q(CN)}{Q(C_2)} = 1,64 \pm 0,76, \quad (2.4)$$

e

$$\frac{Q(CN)}{Q(C_3)} = 20,69 \pm 9,43. \quad (2.5)$$

Deste modo, conhecendo-se a taxa de produção de um desses radicais, podemos, indiretamente, determinar a taxa de produção de água. Imagine, por exemplo, que em certa

observação a taxa de produção do radical cianogênio seja conhecida. Então, a taxa de produção da água para o Cometa 2P/Encke será:

$$Q(H_2O) = \frac{Q(H_2O)}{Q(OH)} \times \frac{Q(OH)}{Q(CN)} \times Q(CN) = 715 \times Q(CN). \quad (2.6)$$

Utilizando o Modelo de Haser para o cometa 2P/Encke, durante as observações realizadas em 17,7 de abril de 1984 (UT), [Osip et al. \(1992\)](#) obtiveram uma taxa de produção para o cianogênio de  $4,1 \times 10^{25}$  moléculas/s. Assim, relacionando com a equação 2.6, tem-se que o cometa estava produzindo  $2,9 \times 10^{28}$  moléculas de água por segundo naquela data observacional.

## 2.4 Método Semi-Empírico de Magnitudes Visuais (MSEMV)

O Método Semi-Empírico das Magnitudes Visuais (MSEMV) se baseia na análise de dados observacionais de magnitudes visuais, obtidos por astrônomos profissionais e amadores, localizados nos mais distintos observatórios e/ou locais apropriados dispostos na Terra. Este método sofreu diversas alterações desde os trabalhos pioneiros de [Bobrovnikoff \(1941, 1943\)](#) referentes ao diâmetro padrão de abertura dos instrumentos utilizados para a observação cometária e a necessidade da aplicação de correções relacionadas a estes. Todas as alterações visavam a obtenção de melhores estimativas para as magnitudes visuais cometárias, independentemente do fato das observações serem realizadas por diversos profissionais experientes. Por exemplo, a necessidade de se aplicar uma correção no diâmetro de abertura foi justificada pelo fato de que um dado cometa aparecerá visualmente mais fraco quando observado com um telescópio de abertura maior que o diâmetro de abertura padrão.

Começamos por denominar  $m_v$  a magnitude visual, publicada nos diversos periódicos (ICQ/BAA) e circulares da IAU e observada a partir da coma de um cometa, por meio de um instrumento com abertura  $d$  (em *cm*).

Seguindo as prescrições de [Bobrovnikoff \(1941, 1943\)](#) e [Morris \(1973\)](#), essa magnitude deve, inicialmente, ser reduzida àquela com uma abertura de diâmetro padrão, isto é, com  $d = 6,78$  *cm*, de modo que:

$$m_{6,78} = m_v - b(d - 6,78), \quad (2.7)$$

onde  $b$  é uma constante dependente do tipo de instrumento. Para refletores,  $b = 0,019 \text{ mag/cm}$ . Já para refratores,  $b = 0,066 \text{ mag/cm}$ . A vista desarmada é considerada um refrator de abertura  $d = 0 \text{ cm}$ .

O segundo termo da equação 2.7 indica a correção bolométrica, considerando a emissão de energia em todos os comprimentos de onda.

Levando-se em conta que a intensidade no brilho de um cometa decresce com o aumento das distâncias heliocêntrica e geocêntrica, temos:

$$I = \frac{I_0}{r_h^n \Delta^k}. \quad (2.8)$$

Dessa forma, a magnitude visual do objeto pode ser definida por:

$$m_v = H_0 + 2,5 k \log(\Delta) + 2,5 n \log(r_h), \quad (2.9)$$

onde  $H_0$  é a magnitude visual absoluta a  $\Delta = r_h = 1 \text{ ua}$ ,  $k$  possui um valor médio ( $= 2$ ) e  $n$  é um fator associado à atividade cometária. Esta equação é particularmente útil na construção de curvas de luz cometárias.

Reduzindo a magnitude àquela que o cometa teria se estivesse a uma distância geocêntrica padrão de  $1 \text{ ua}$ , temos:

$$m'_v = m_{6,78} - 5 \log \Delta. \quad (2.10)$$

Essas correções básicas devem ser aplicadas à equação fotométrica cometária que, essencialmente é expressa como a soma das contribuições da radiação do núcleo, do gás e da poeira. [de Almeida et al. \(1997\)](#) a expressou por:

$$r^2 \cdot 10^{0,4(-26,8-m'_v)} = A\phi_N(\alpha) + Bf_1(r) + C\phi(\theta)f_2(r), \quad (2.11)$$

onde  $r^1$  é a distância heliocêntrica (em  $ua$ ) do cometa,  $-26,8$  é a magnitude visual aparente do Sol,  $\phi_N(\alpha)$  é a função de fase do núcleo para o ângulo de fase  $\alpha$  (Sol-Cometa-Observador),  $\phi(\theta)$  é a função de fase da poeira para o ângulo de espalhamento  $\theta = 180 - \alpha$ ,  $f_1(r)$  é a taxa de produção do gás, em função da distância heliocêntrica, e  $f_2(r)$  é a taxa de produção da poeira, também dependente da distância heliocêntrica. Aqui, o parâmetro  $A$  é dado por:

---

<sup>1</sup> Onde  $r = r_h$ .

$$A = pR_N^2, \quad (2.12)$$

onde  $p$  é o albedo geométrico médio do núcleo e  $R_N$  é o seu raio nuclear, sendo este considerado esférico. É importante ressaltar que todos os termos da equação fotométrica cometária são expressos em unidade de área; isto é, em  $cm^2$  (ou  $km^2$ ).

Se o cometa se encontra a uma grande distância do Sol ( $r > 2,5 \text{ ua}$ ), os parâmetros  $B$  e  $C$  da equação 2.11 são nulos e esta se reduz a:

$$r^2 \cdot 10^{0,4(-26,8-m+5\log(\Delta))} \approx A\phi_N(\alpha) = pR_N^2\phi_N(\alpha), \quad (2.13)$$

onde  $m$  é a magnitude nuclear para grandes distâncias heliocêntricas.

O cálculo da contribuição nuclear é delicado uma vez que envolve o conhecimento prévio da dimensão efetiva do núcleo do cometa. Estudando uma amostra cometária, [Sanzovo et al. \(1996\)](#) obtiveram:

$$A\phi_N(\alpha) = pR_N^2\phi_1 e^{-\mu\alpha}, \quad (2.14)$$

onde  $\mu = 1,842 \text{ rad}^{-1}$  e  $\phi_1 = 0,9982$ , e o ângulo de fase  $\alpha$  é tomado em radianos.

De modo similar, [Lamy et al. \(2004\)](#), considerando, agora,  $\alpha$  em graus, utilizaram a expressão:

$$A\phi_N(\alpha) = pR_N^2\phi_1 x 10^{-(0,4\cdot\alpha\cdot\Delta m)}, \quad (2.15)$$

onde o albedo geométrico  $p = 0,04 \pm 0,017$  e o coeficiente linear de fase  $\Delta m = 0,04 \pm 0,02 \text{ mag/graus}$  foram aplicados com o intuito de encontrar a fase nuclear. As duas expressões acima (2.14 e 2.15) foram incorporadas em nossa grade computacional para fins de comparação dos resultados encontrados. Ambas são similares em termos de resultados, de modo que a escolha entre elas para o cálculo da contribuição nuclear é arbitrária. [Lamy et al. \(2004\)](#) ainda destacam que a aplicação do coeficiente linear de fase ao núcleo de qualquer cometa,  $\Delta m$ , pode gerar um impacto de incerteza de 20% sobre o valor do cálculo do seu raio nuclear.

É importante salientar, aqui, que, ao rodar nosso código FORTRAN, nós, inicialmente, assumimos um raio nuclear mínimo e arbitrário ( $R_N = 1,0 \text{ km}$ ) o que nos forneceu uma

noção de que a contribuição nuclear para o Cometa Kohler era muito pequena, quase desprezível, em função da variação do ângulo de fase envolvida nas observações. De qualquer modo, essa contribuição foi considerada e o código foi novamente rodado utilizando-se, a posteriori, o raio nuclear efetivo do cometa, obtido com o auxílio de uma sub-rotina que incorpora a lei de vaporização da água, resultado das pesquisas de [Cowan e A'Hearn \(1979\)](#) e [Delsemme \(1982\)](#), como descreveremos mais adiante neste capítulo.

Desta forma, a equação fotométrica se reduz a:

$$B(r)f_1(r) + C\phi(\theta)f_2(r) = r^2 \cdot 10^{0,4(-26,8-m'_v)} - pR_N^2 \cdot 10^{-(0,4\alpha\Delta m)}. \quad (2.16)$$

Os parâmetros  $B$  e  $C$  dependem das taxas de produção do gás e da poeira, respectivamente, e ambos variam com a distância heliocêntrica. Tomando  $[M]$  como sendo o lado direito da equação 2.16, poderemos reescrever a equação fotométrica como:

$$B(r)f_1(r) \left[ 1 + \frac{C(r)f_2(r)\phi(\theta)}{B(r)f_1(r)} \right] = [M]. \quad (2.17)$$

É interessante notar que, uma vez não tendo o comportamento individual da poeira com a distância heliocêntrica conhecido, [de Almeida et al. \(1997\)](#) optaram por trabalhar com uma razão poeira-gás, representado em 2.17 como sendo o segundo termo entre colchetes, e indicando essa razão por  $\delta(r, \theta)$ , de modo que:

$$B(r)f_1(r)[1 + \delta(r, \theta)] = [M]. \quad (2.18)$$

Porém, de acordo com [A'Hearn et al. \(1995\)](#),

$$B(r)f_1(r) \propto B(r)Q(H_2O) = R_1T(S), \quad (2.19)$$

sendo  $R_1$  o fator de eficiência fluorescente do radical carbetto ( $C_2$ ) e  $T(S)$  representa o número total dos radicais carbetto dispostos em uma área circular de raio  $S$  (em  $km$ ), centrada sobre o núcleo do cometa. Além disso, utilizando o Modelo de Haser em suas observações, [A'Hearn et al. \(1995\)](#) também verificaram que:

$$T(S) \approx \frac{Q_p(C_2)}{v} l_r, \quad (2.20)$$

onde  $l_r$  é a escala de comprimento do radical  $C_2$ , ou seja, é a distância que o radical percorre na coma antes de ser dissociado pela radiação UV solar,  $v$  é a sua velocidade e  $Q_p(C_2)$  é a taxa de produção do radical. Assim, a equação 2.19 pode ser reescrita como:

$$B(r)Q(H_2O) \approx R_1 \frac{Q_p(C_2)}{v} l_d, \quad (2.21)$$

em que  $Q(H_2O)$  é a taxa de produção de água. É importante ressaltar, aqui, que o radical carbeto é utilizado por ser uma das espécies moleculares que mais comumente aparecem nos espectros ao longo das passagens periélicas dos cometas.

Uma importante correlação entre a taxa de produção de água e a taxa de produção do  $C_2$  nos cometas 1P/Halley, 2P/Encke, 8P/Tuttle, 23P/Borsen-Metcalf, 38P/Stephan-Oterma e 103P/Bradfield foi deduzida por [de Almeida et al. \(1997\)](#) e, posteriormente, confirmada por [Sanzovo et al. \(2001\)](#), com a inclusão dos cometas C/1984 V1 (Levy), 67P/Churyumov-Gerasimenko, 6P/d'Arrest, 8P/Tempel 1, 9P/Tempel 2 e 81P/Wild 2 à amostra inicial. As taxas de produção de água foram determinadas através da observação do radical  $OH$  por meio do método da fotodissociação, enquanto que as taxas de produção do radical carbeto foram obtidas através do modelo clássico de Haser, utilizando, para isso, as contribuições observacionais de diversos pesquisadores ([A'Hearn et al., 1979, 1980, 1985](#); [Osip et al., 1992](#); [Fink et al., 1999](#); [Torres, 2000](#)). Com isso, [Sanzovo et al. \(2001\)](#) demonstraram a existência de uma relação de proporcionalidade entre ambas as taxas de produção, relação esta expressa por:

$$Q(H_2O) \propto [Q_p(C_2)]^{0,82 \pm 0,06}, \quad (2.22)$$

confirmando, assim, os resultados iniciais de [de Almeida et al. \(1997\)](#) e estendendo o domínio de sua amostra cometária para também incluir cometas de longo-período. Desse modo, a equação 2.21 é reescrita por:

$$B(r)Q(H_2O) \propto \frac{l_r}{v} R [Q(H_2O)]^{1,22}. \quad (2.23)$$

Com o uso da equação 2.23, a expressão 2.18 transforma-se em:

$$R \frac{[Q(H_2O)]^{1,22} \cdot l_r}{v} = \frac{[M]}{[1 + \delta(r, \theta)]}, \quad (2.24)$$

onde  $R$  (em  $cm^2 \cdot s$ ) é um parâmetro que discutiremos mais adiante. A escala de comprimento para a distribuição do radical carbeto na coma vale  $l_r = 6,6 \times 10^4 \times r^2 km$  (Randall et al., 1992; A'Hearn et al., 1995).

Assumindo a velocidade de expansão da água como constante  $v = 1,0 km \cdot s$ , a sua taxa de produção (em moléculas/s) será, então, determinada por:

$$Q(H_2O) = \left\{ \frac{r^2 \cdot 10^{[0,4(-26,8-m'_v)]} - pR_N^2 \cdot 10^{-(0,4\alpha \cdot \Delta m)}}{R \cdot 6,6 \times 10^4 \cdot r^2 [1 + \delta(r, \theta)]} \right\}^{0,82 \pm 0,06}. \quad (2.25)$$

De acordo com os resultados da pesquisa realizada por Sanzovo et al. (2001), o parâmetro  $R$  no denominador da equação 2.25, pode variar entre uma gama de valores compreendida entre  $1 \times 10^{-36}$  e  $1 \times 10^{-39} cm^2 \cdot s$ , com concentração em  $1,7_{+5,2}^{-0,6} \times 10^{-38} cm^2 \cdot s$ , e este valor praticamente confirma o valor inicialmente obtido por de Almeida et al. (1997). Esse valor foi adotado para o Cometa Kohler nesta dissertação.

Ainda com respeito à equação 2.25, há duas maneiras de se encontrar a razão poeira-gás de um cometa, quando não se tem de forma explícita as observações dos fluxos no contínuo, para comprimentos de onda ópticos, responsáveis pela poeira: a) considerar uma razão poeira-gás constante, o que nos parece bastante irreal, ou b) expressá-la na forma como de Almeida et al. (1997) e Sanzovo et al. (2001) fizeram; ou seja, atrelando-a à função de espalhamento,  $\delta(\theta)$ , da poeira. Assim, toma-se como referência a expressão de Ney (1982):

$$\delta(r, \theta) = \frac{\delta(r, 90^\circ) \cdot \phi(\theta)}{\phi(90^\circ)}, \quad (2.26)$$

onde os correspondentes valores da função de espalhamento da poeira,  $\delta(\theta)$  são obtidos a partir das curvas observacionais propostas por Divine (1981), para o ângulo de espalhamento  $\theta = 180 - \alpha$ , enquanto  $\delta(90^\circ) = 0,036$ .

Para o intervalo de distâncias heliocêntricas  $0,5 < r < 2,5 (ua)$ , de Almeida et al. (1997) e Sanzovo et al. (2001) obtiveram:

$$\delta(r, 90^\circ) = 0,61(\pm 0,25) \cdot r^{1,8 \pm 0,5}. \quad (2.27)$$

Dessa maneira, com a substituição de 2.27 em 2.26, as razões poeira-gás são obtidas e utilizadas no cálculo das taxas de produção de água do Cometa Kohler.

Desde a “Armada Halley”, em 1986, observações realizadas a partir do solo, do espaço e *in situ* em cometas do tipo Halley, de Curto-Período e de Longo-Período têm revelado que a água é o componente volátil mais abundante em cometas. Como a composição química do Cometa Kohler é desconhecida, nós assumimos que o gás total compreende uma mistura de  $\sim 90\%$  de água e  $\sim 10\%$  de outros gases com peso molecular médio de cerca de 44 *Da*. Desse modo, se quisermos expressar a taxa de produção total do gás (em *g/s*) em termos da taxa de produção de água (em moléculas/s), podemos escrever que:

$$Q_g = [(0,90 \cdot 18,015 + 0,1 \cdot 44,0)]Q(H_2O)/N_V, \quad (2.28)$$

ou

$$Q_g = 3,42 \times 10^{-23} Q(H_2O). \quad (2.29)$$

onde  $Q(H_2O)$  é a taxa de produção de água, obtida pelo MSEM. Mais especificamente, através da equação 2.25, para cada distância heliocêntrica no intervalo de distância heliocêntrica ( $0,5 < r(\text{ua}) < 2,5$ ), e  $N_V$  é o número de Avogadro associado a 1 molécula por grama de gás.

Levando-se em consideração que um dos produtos da fotodissociação da água é o radical hidroxila e que, em cometas, a eficiência desse processo químico é  $\sim 85\%$  (Huebner et al., 1992), as taxas de produção desse radical também podem ser obtidas a partir da equação 2.25.

Em síntese, o que nos propusemos a fazer nesta dissertação é utilizar este método eficiente e robusto para transformar os únicos dados observacionais existentes na literatura, as magnitudes visuais aparentes, em taxas de produção de água (em moléculas/s) e, assim, convertê-las em taxas de produção de gás (em *g/s*), assumindo a composição química acima descrita para o Cometa Kohler.

## 2.5 Modelo de vaporização da água e a dimensão nuclear

A dimensão nuclear do Cometa Kohler foi deduzida associando as taxas de produção de água, obtidas a partir do MSEM, aos resultados obtidos a partir do Modelo de Vaporização da Água. Este modelo foi desenvolvido inicialmente por Cowan e A’Hearn (1979) e posteriormente aperfeiçoado por Delsemme (1982).

Para um núcleo cometário esférico, a estimativa que fazemos neste trabalho é a que se aproxima àquela de um hemisfério voltado para o Sol, com área superficial efetiva igual à soma das regiões ativas. Para isto, é conveniente escrever a equação de balanço radiativo como (Cowan e A'Hearn, 1979; Delsemme, 1982; Schmidt e Wegmann, 1988):

$$\frac{F_{\odot}(1 - A_v)}{r^2} \cdot \frac{\pi R_N^2}{2\pi R_N^2} \cdot e^{-\tau} = \epsilon\sigma T_s^4 + Z(T_s)L(T_s)/N_V, \quad (2.30)$$

em que o lado esquerdo incorpora os processos da insolação e da reflexão solar, enquanto os dois termos do lado direito da mesma equação, tem em conta a re-irradiação pela superfície nuclear e a sublimação da água, respectivamente.  $F_{\odot}$  é o fluxo da energia solar para  $r = 1,0$  *ua* [=  $1,368 \times 10^6$  *erg/(cm<sup>2</sup>·s)*],  $R_N$  é o raio nuclear do cometa (em *cm*),  $\tau$  é a profundidade óptica da coma (assumimos aqui que  $e^{-\tau} = 1$ ),  $A_v$  (= 0,04) é o albedo visual médio do núcleo,  $\epsilon = 1 - A_{IV} = 0,97$  é a sua emissividade no infravermelho,  $\sigma$  é a constante de Stephan-Boltzmann [=  $5,67 \times 10^{-5}$  *erg/(cm<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>·s)*],  $T$  é a temperatura de equilíbrio entre a água e o conglomerado de gelos sobre a superfície nuclear,  $Z(T)$  é a taxa de produção de água por unidade de área superficial [em molécula/(*cm<sup>2</sup>·s*)],  $L(T)$  é o calor latente de “vaporização” (sublimação) da água por mol, e  $N_V$  [=  $6,022 \times 10^{23}$  *mol<sup>-1</sup>*] é o número de Avogadro. Verificamos, então, que a equação 2.30 apresenta cinco parâmetros plenamente identificados  $F_0, R_N, A_v, \tau$  e  $\epsilon$ , o que nos deixa com uma equação e duas incógnitas:  $Z(T)$  e  $L(T)$ .

Para resolver a equação 2.30, precisamos de pelo menos uma equação adicional. Usamos aquela fornecida por Clausius-Clapeyron que relaciona a pressão com o calor latente em função da temperatura de equilíbrio:

$$p(T) = \frac{1}{2}p_r \cdot e^{\left[\frac{L(T)}{kN_0} \cdot (1/T_r - 1/T)\right]}, \quad (2.31)$$

assumindo que estamos trabalhando com um gás ideal para o qual a equação de estado é dada por  $p(T) = nkT$ , onde  $k$  [=  $1,38 \times 10^{-16}$  *erg/K*] é a constante de Boltzmann. As variáveis  $p_r$  e  $T_r$  representam a pressão de vapor à temperatura de referência (digamos, o ponto triplo). Nessa equação, o fator 1/2 foi introduzido para levar em conta a aproximação hemisférica aqui adotada.

De acordo com Murphy e Koop (2005), o calor latente de sublimação (em *erg/mol*), válido para  $T > 30$  *K*, e a pressão (em *dina/cm<sup>2</sup>*) para  $T > 110$  *K* são dados por:

$$L(T) = 1 \times 10^7 \cdot [46782,5 + 35,8925T - 0,07414 \times T^2 + 541,5e^{-\left(\frac{T}{123,752}\right)^2}] \quad (2.32)$$

e

$$p(T) = 10 \cdot e^{[9,550426 - \frac{5723,265}{T} + 3,53068 \times \ln(T) - 0,00728332T]}, \quad (2.33)$$

de modo que, para a temperatura de referência adotada ( $T_r = 273,16 \text{ K}$ ),  $L_r = 51059 \times 10^7 \text{ erg/mol}$  e  $p_r = 61165,7 \text{ dyn/cm}^2$ .

As equações 2.32 e 2.33, bem como a temperatura e pressão de referência, foram incorporadas em 2.31 e seu resultado na equação de balanço radiativo, facilitando, desta forma, o cálculo das taxas de vaporização da água,  $Z(T)$ , por unidade de área, em função da distância heliocêntrica.

Para a aproximação utilizada, a de um núcleo esférico, com lenta rotação, de modo tal que um hemisfério é totalmente iluminado pelo Sol, tem-se que (de Almeida et al., 1997):

$$2\pi \times R_N^2 f_{AA} \times Z(T) = Q(H_2O), \quad (2.34)$$

onde  $f_{AA}$  é a fração de área superficial ativa do cometa. Quando essa fração é unitária, obtém-se uma estimativa do raio nuclear mínimo do cometa. Para o cometa Kohler, um raio nuclear mínimo  $R_{min} = 0,9 \text{ km}$  foi deduzido. Por seu turno, se soubermos a fração de área superficial ativa do cometa longe do periélio, poderemos ter uma estimativa da sua dimensão efetiva. Tendo em vista o espalhamento dos resultados para a área superficial ativa do cometa nas proximidades do periélio, e esse espalhamento é típico e resultante das medidas de magnitudes visuais, nós consideramos um valor máximo para a área superficial ativa como sendo  $\sim 50 \text{ km}^2$  nas proximidades do periélio e confrontarmos esse valor com o valor mínimo dos resultados obtidos longe do periélio ( $r = 1,8 \text{ ua}$ ); ou seja,  $A_A \sim 4,0 \text{ km}^2$ . Com isso, verificamos uma fração de área ativa da ordem de 8%, de modo que é coerente com um raio nuclear efetivo  $R_N = 2,9 \pm 1,4 \text{ km}$ , para uma taxa de vaporização de água  $Z(T) = 1,6 \times 10^{17} \text{ moléculas}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  e taxa de produção média equivalente a  $6,8 \times 10^{27}$  moléculas de água por segundo.

## 2.6 A grade computacional

Nas seções anteriores deste capítulo, nós procuramos descrever, de modo sucinto, os principais modelos e métodos existentes na literatura para o cálculo das taxas de produção

da água (e do gás) em cometas e, mais detalhadamente, o modelo utilizado nesta dissertação. Toda a estrutura do MSEMV foi incorporada em um código computacional desenvolvido por nosso grupo de pesquisa e escrito na linguagem FORTRAN, denominado *LOFEAR*.

Para a sua compilação e execução, o código *LOFEAR.FOR* necessita de um arquivo de entrada que contempla dados sobre as datas das observações do Cometa Kohler, as magnitudes visuais aparentes e o suporte básico (tipo de telescópio e diâmetro de abertura) de cada uma dessas observações. O arquivo de entrada contempla 1077 dados observacionais, sendo 886 destes na fase pré-periódica e 191 na fase pós-periódica.

Todo o programa é essencialmente constituído por 4 subrotinas: *jd*, *rdtet*, *active* e *subl*. A subrotina *jd* transforma as datas observacionais em Datas Julianas. Para isso, além das informações sobre os elementos orbitais do cometa (período, excentricidade da órbita, inclinação, etc.), ela se utiliza dos fundamentos básicos da Mecânica Celeste, os quais envolvem a aplicação das leis de Kepler para os tipos de órbitas cometárias existentes (elíptica, parabólica e hiperbólica). A subrotina *rdtet* encontra as coordenadas de posição [heliocêntrica,  $r$  (em  $ua$ ) e geocêntrica,  $\Delta$  (em  $ua$ )] do cometa, relativas a cada observação inserida no arquivo de entrada do programa e determina os ângulos de fase e as respectivas funções de espalhamento da poeira, enquanto que *active* tem a função de ler as magnitudes visuais aparentes e transformá-las em taxas de produção de água (em moléculas/s). A conversão destas em taxas de perda de gás (em  $g/s$ ) ocupa o espaço de apenas uma linha nesta mesma subrotina. Por fim, *subl* incorpora a teoria de vaporização de [Cowan e A'Hearn \(1979\)](#) e [Delsemme \(1982\)](#), encontrando as taxas de vaporização de água [em moléculas/( $cm^2 \cdot s$ )] e auxiliando, desta forma, na dedução das dimensões nucleares do Cometa Kohler.

## O cometa Kohler

Os capítulos anteriores nos deram as ferramentas necessárias para compreender o desenvolvimento desse trabalho, ou seja, a descrição dos principais métodos e modelos comumente utilizados para a determinação da produtividade gasosa de um cometa. O *MSEMV* foi aplicado ao cometa Kohler e, neste capítulo apresentaremos os principais resultados obtidos. Assim, começaremos a apresentação destes.

O cometa Kohler, objeto principal deste estudo e já apresentado na seção de introdução, possui uma órbita significativa, quase-parabólica, com uma excêntricidade próxima a 1.

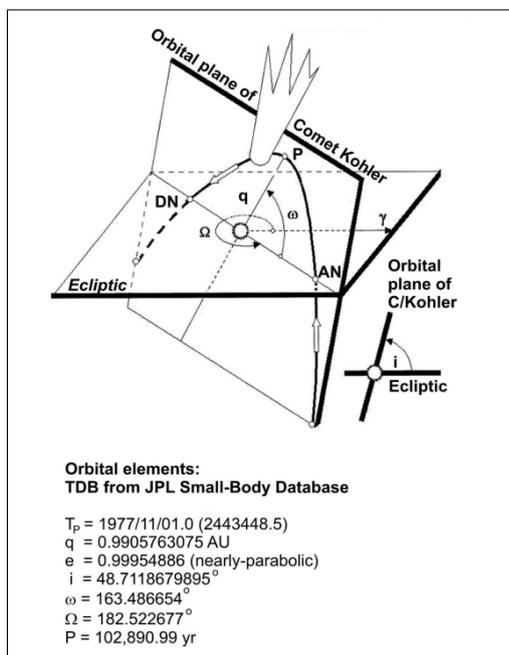


Figura 3.1: Elementos orbitais do cometa C/ 1977 R1 (Kohler) e sua representação gráfica.

A figura 3.1 apresenta os principais parâmetros orbitais do cometa, sendo  $T_p$  a sua data periélica,  $q$  a distância periélica,  $e$  sua excêntricidade,  $i$  a inclinação com relação ao plano

da eclíptica,  $\omega$  o argumento do periélio, medido entre o nó ascendente ao ponto do periélio,  $\Omega$  a longitude do nó ascendente, representando o ângulo do equinócio vernal ao longo do plano da eclíptica ao ponto de interseção do plano orbital com esse plano, e  $P$  o período orbital. Todos os valores destes elementos foram retirados do banco de dados do JPL (*Jet Propulsion Laboratory*)<sup>1</sup> da NASA e confirmados pelo *Minor Planet Center*<sup>2</sup> da IAU (*The International Astronomical Union*).

Considerando as informações disponíveis para os estudos das características físicas e químicas do cometa e os métodos de análise apresentados, seguiremos para a exposição e discussão dos resultados.

### 3.1 Base de dados

Unindo as bases disponíveis nas bibliotecas de dados incluídas na plataforma *COBS*, extraímos os valores de magnitude visual, tendo sido estes medidos com variados tipos e tamanhos de instrumentos. Assim, o *ensemble* de elementos tratado, aqui, indica as características dos instrumentos utilizados (tipo e abertura) e em qual data (dia, fração do dia, mês e ano) a observação do cometa foi realizada. A base completa de dados é distribuída em um período de 7,46 de setembro de 1977 a 8,37 de fevereiro de 1978.

A tabela, a seguir, foi construída a partir de todos os dados observacionais encontrados na literatura para o cometa Kohler. Esta os dispõe de acordo com a fase (pré e pós-periódica) e o tipo de instrumento.

*Tabela 3.1* - Quantidade de observações realizadas para o cometa Kohler durante suas fases pré e pós periódicas utilizando telescópios refratores e refletos.

Fase periódica	Instrumentos Refratores	Instrumentos Refletos	<b>Total</b>
Pré	518	368	886
Pós	150	41	191
<b>Base completa</b>	<b>668</b>	<b>409</b>	<b>1077</b>

Deste modo, dispomos de observações realizadas principalmente na fase pré-periódica do cometa, tendo sido tomadas, em sua maioria, a partir de telescópios refratores.

<sup>1</sup> <https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi>.

<sup>2</sup> <https://minorplanetcenter.net/data>.

A figura 3.2 simula a órbita quase-parabólica do cometa Kohler. Ela foi construída levando-se em conta o conjunto completo dos dados disponíveis, as respectivas distâncias heliocêntricas e o número de dias antes ( $< 0$ ) e depois ( $> 0$ ) da passagem pelo periélio, sendo que estes parâmetros foram obtidos a partir do código *LOFEAR.FOR*.

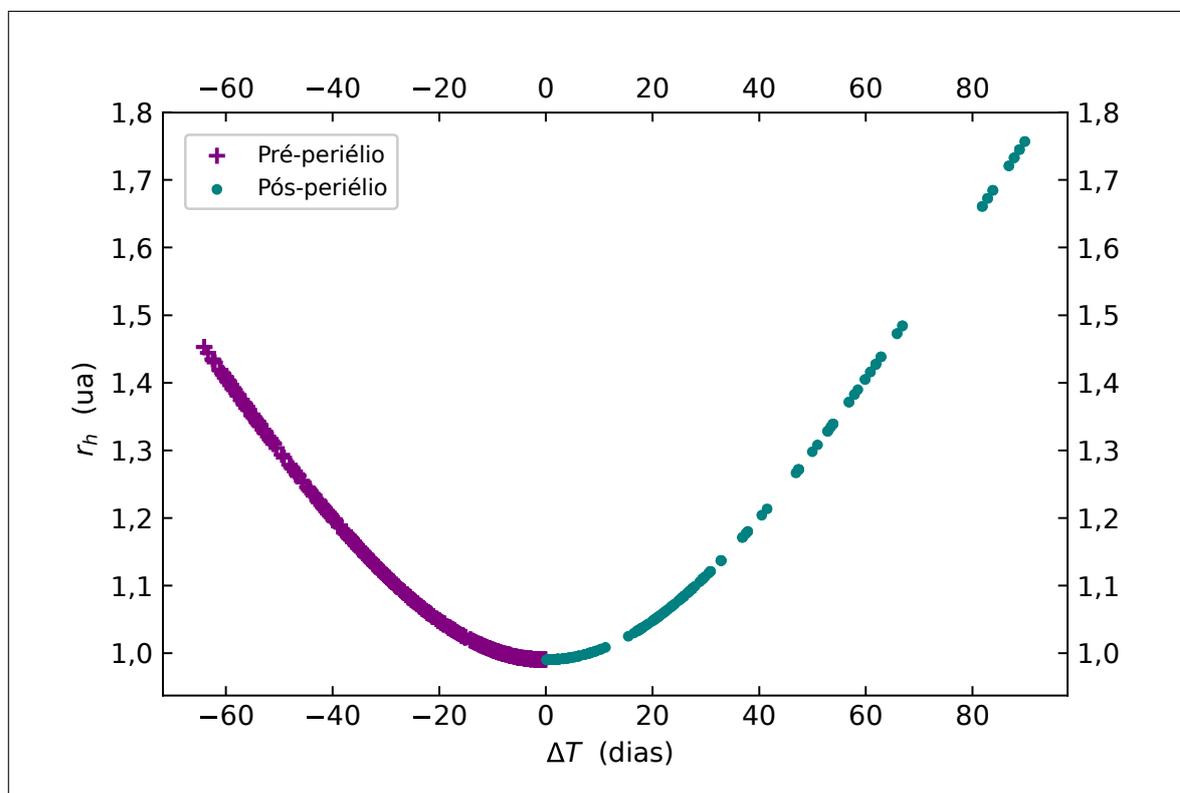


Figura 3.2: A órbita quase-parabólica do cometa Kohler.

### 3.1.1 Eficiência dos dados

Devido a possíveis erros recorrentes nas observações, como interferências do brilho da lua, calibração errônea ou a falta dela (como bias e flats), grandes coeficientes de extinção atmosférica com a proximidade ao horizonte ou outros desvios sistemáticos causados pelo observador, estamos lidando com uma distribuição inomogênia e rãndomica dos resultados. Alguns dados foram expurgados por apresentarem grande desvio se comparados ao *ensemble* completo. Além disso, por envolver observações com instrumentos distintos (refletores e refratores), coube a verificação da eficiência de cada um deles.

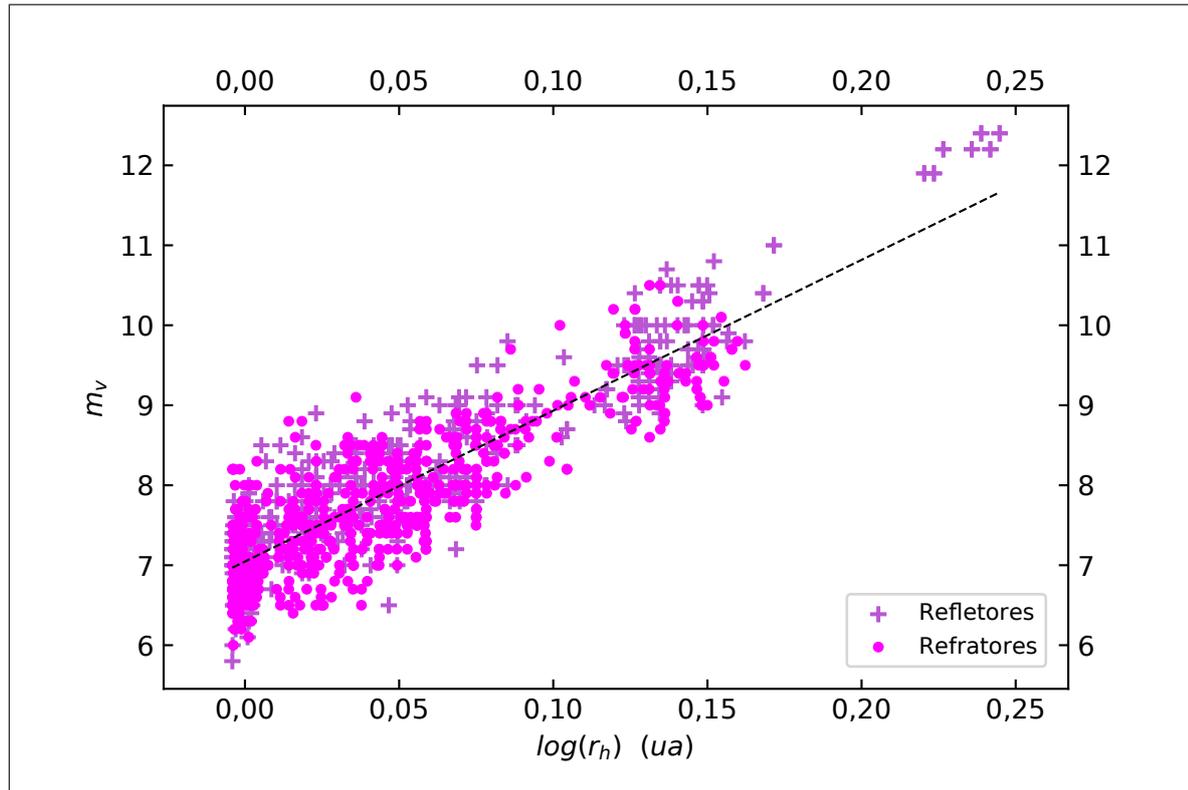


Figura 3.3: Distribuição das magnitudes da base de dados, adquiridas por observações utilizando telescópios refratores e refletos, com a distância heliocêntrica.

A figura 3.3 indica a distribuição de dados para cada tipo de instrumento. Desta, temos que a regressão linear e o comportamento dos dados, de acordo com a distância heliocêntrica, apresentam um coeficiente de correlação melhor, e, por consequência, menos espalhamento, para os pontos representantes dos telescópios refletos, com valor de cerca de 0,8, sendo que os refratores apresentam apenas 0,62. Acoplando as duas bases e aumentando o número de amostras, vemos que o índice cai para 0,7. Apesar disto, a diferença não foi tão significativa. Assim, permanecemos com a união das bases.

### 3.2 Relações para as magnitudes visuais

Cometas, por terem brilhos característicos e leis para definição destes que dependem das distâncias heliocêntricas e geocêntricas (ver eq. 2.9), dão margem para o estudo da variação temporal da magnitude quando está se aproximando ou se afastando do Sol.

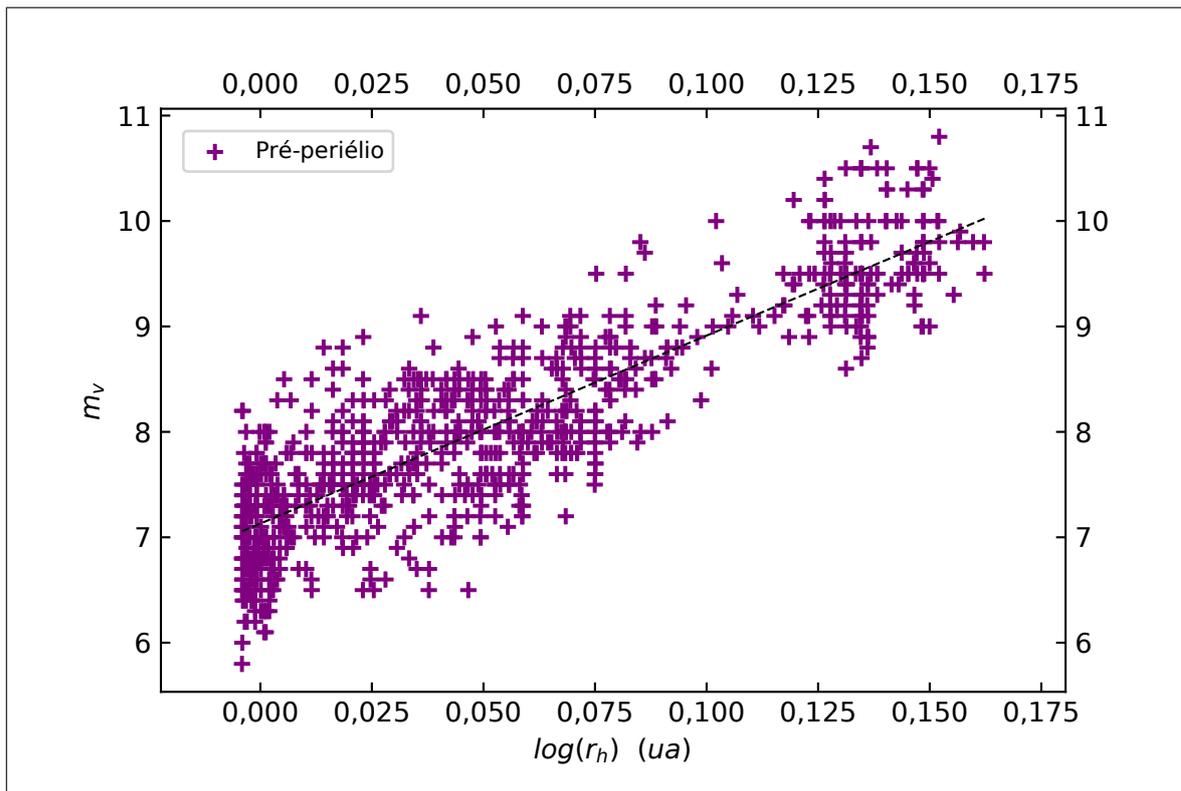


Figura 3.4: Variação de magnitude definida para o cometa Kohler na fase pré-periélica.

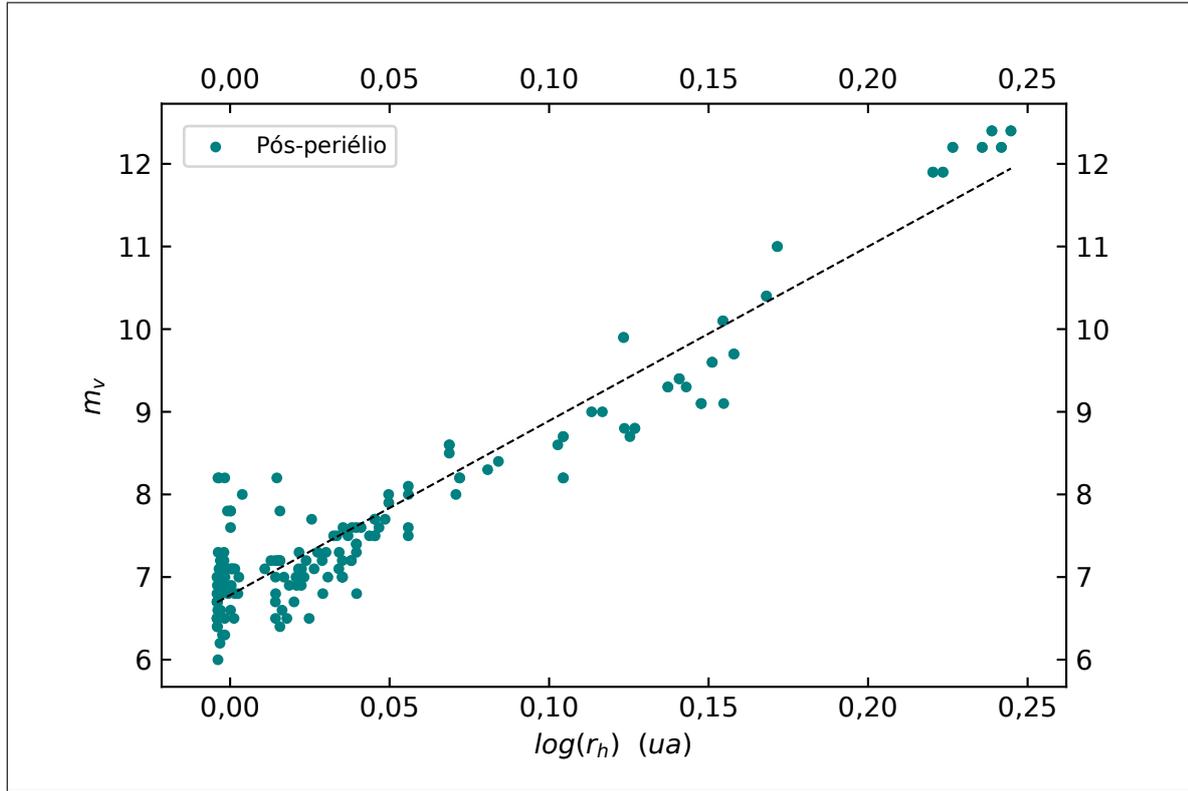


Figura 3.5: Variação de magnitude definida para o cometa Kohler na fase pós-periélica.

As figuras 3.4 e 3.5 indicam comportamentos semelhantes para as fases pré e pós periélicas, com constantes e crescentes (ou decrescentes, considerando a escala inversa) valores de magnitude. Assim, é esperado que o cometa não tenha sofrido muitas perdas de seu material por sublimação ou interação gravitacional direta com a pressão de radiação solar. Analisando as leis de potência, dadas por:

$$\text{Pré-Periélio : } m_v = (7,13 \pm 0,02) + (17,82 \pm 0,34) \log(r_h) \quad (3.1)$$

$$\text{Pós-Periélio : } m_v = (6,78 \pm 0,04) + (21,08 \pm 0,45) \log(r_h) \quad (3.2)$$

vemos que os coeficientes linear e angular das duas fases são muito próximos, com índices de confiabilidade similares, de cerca de 0,84. Além disso, considerando que o limite de magnitude para observação de um objeto a olho nu é de 6,5 mag, percebemos que o cometa Kohler pôde ser visualizado próximo de seu periélio, apresentando um brilho intenso.

Comparando as relações 3.1 e 3.2 com a equação 2.9 e considerando a magnitude ajustada a uma distância geocêntrica padrão de  $\Delta = 1 \text{ ua}$ , determinamos os índices  $n$

de 7,13 e 8,43 para as fases pré e pós-periélicas, respectivamente. Estes expoentes muito maiores que o limite para reflexão total da luz solar incidente ( $n = 2$ ) apontam uma superfície nuclear de agitada atividade, com altas emissões de gás, característica de cometas jovens de longo período (Newburn e Spinrad, 1989). De fato Whipple (1978) cita que este valor do expoente de  $r_h$  relacionado com a magnitude aumenta de acordo com a idade dinâmica cometária.

Incluindo as correções necessárias, como a bolométrica, citadas no capítulo anterior, reescrevemos as leis de potência, apresentadas abaixo, de modo a analisar a magnitude visual corrigida. Isto está indicado nas figuras 3.6 e 3.7.

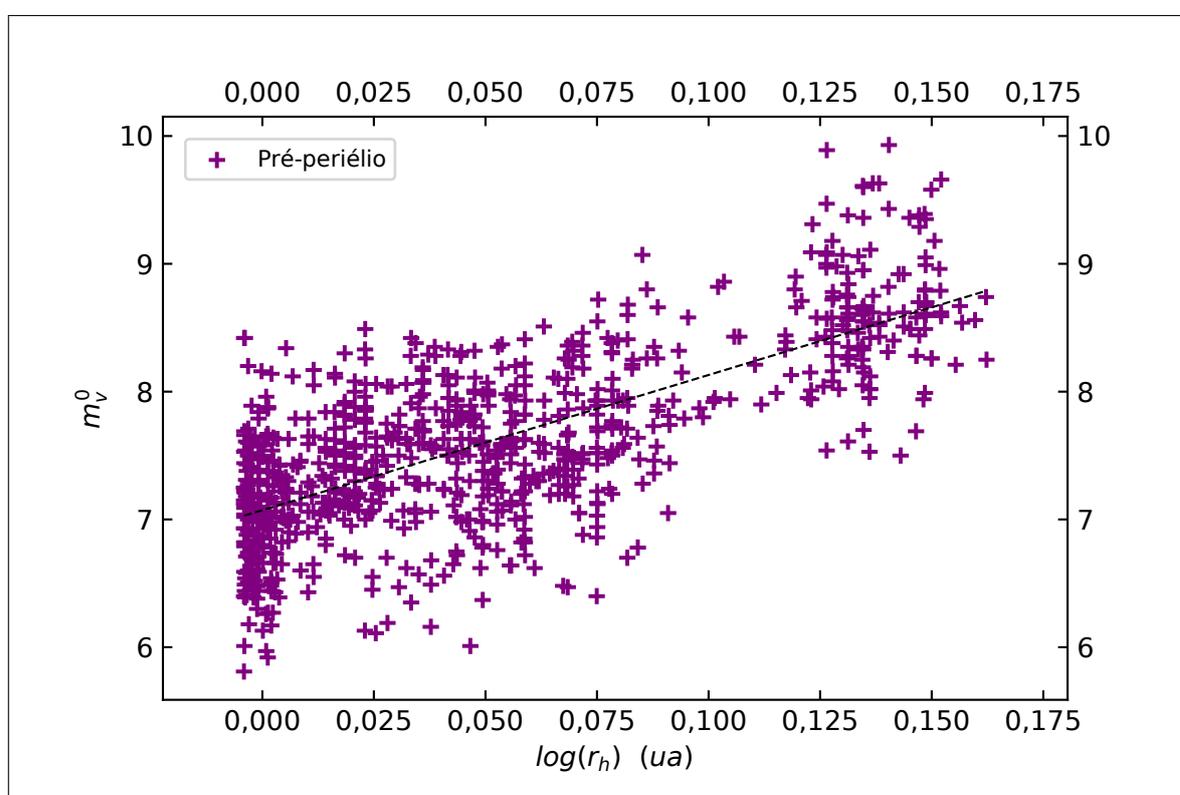


Figura 3.6: Magnitudes corrigidas e sua distribuição com a distância heliocêntrica do cometa (fase-pré).

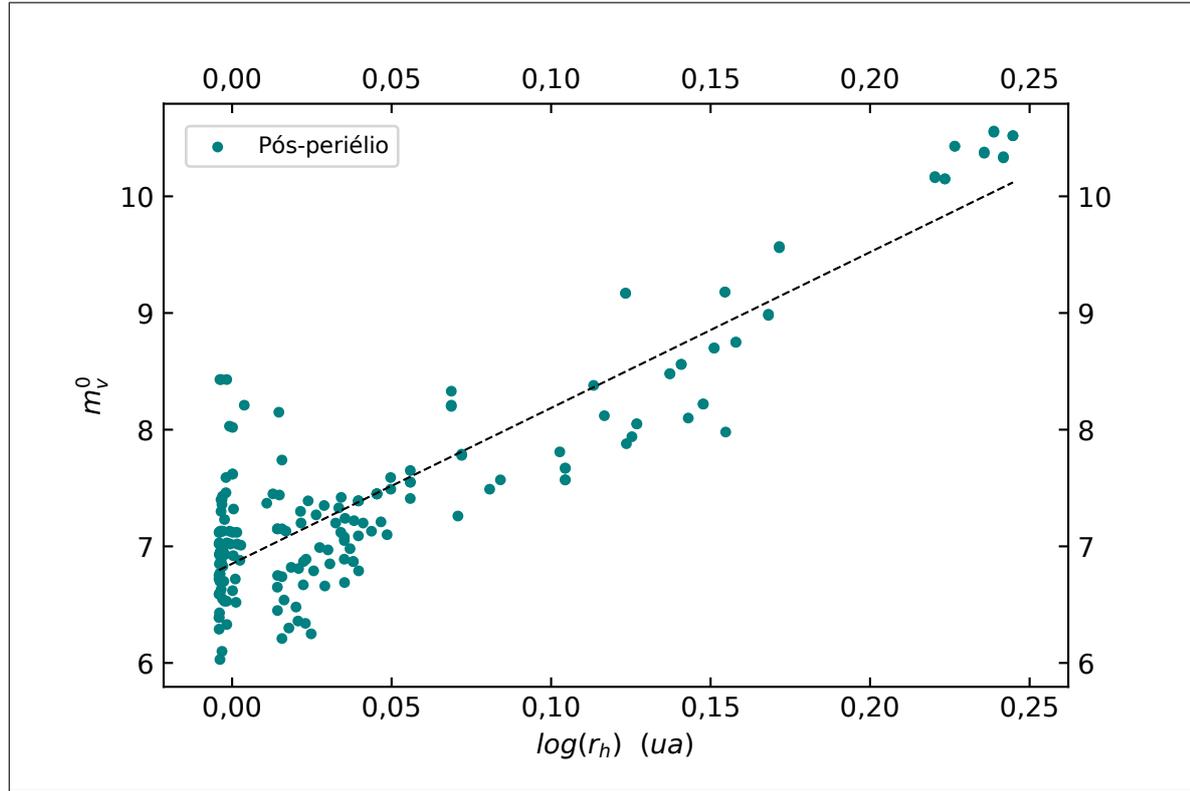


Figura 3.7: Magnitudes corrigidas e sua distribuição com a distância heliocêntrica do cometa (fase-pós).

$$\text{Pré-Periélio : } m'_v = (7,07 \pm 0,02) + (10,58 \pm 0,34) \log(r_h) \quad (3.3)$$

$$\text{Pós-Periélio : } m'_v = (6,85 \pm 0,04) + (13,35 \pm 0,48) \log(r_h) \quad (3.4)$$

Vemos que a diferença é pequena, porém, os coeficientes angulares, neste caso, diminuíram, apresentando um comportamento menos íngreme. O espalhamento das observações aumentam para valores pequenos de  $r_h$  e as correlações para as fases pré e pós periélicas são de 0,66 e 0,71, respectivamente.

Para as 4 figuras relacionando magnitudes com a distância heliocêntrica, percebemos que, mais próximo de Sol, a cerca de  $r_h = 1,20 \text{ ua}$  na fase pré-periélica em 30 de outubro de 1977, e a  $r_h = 1,10 \text{ ua}$  em 13 de dezembro de 1977, na fase pós-periélica, a magnitude tende a atingir valores constantes. Sua maior variação em posições afastadas do Sol pode se dever ao fato de que a produção de  $OH$  ocorre em menor escala nestas localidades, sendo esta molécula resultante da dissociação da água a altas temperaturas.

### 3.3 Taxas de produção e suas consequências

Estabelecendo a base de dados e as relações para as magnitudes adquiridas destas, obtemos os primeiros resultados para as taxas de produção a partir da aplicação do método semi-empírico de magnitudes visuais (eq.2.25). Assim, continuamos a estabelecer as relações de interesse.

#### 3.3.1 Água

Adotando o *MSEMV* ao conjunto de dados observacionais disponíveis, obtivemos as taxas de produção de água e o seu comportamento com a distância heliocêntrica. Assim, reduzimos os resultados às equações 3.5 e 3.6, referentes às relações lineares<sup>3</sup> apresentadas nas figuras 3.8 e 3.9, com índices de confiança, também, de 0,78 para a fase pré-periódica e de 0,92 para a pós-periódica, respectivamente.

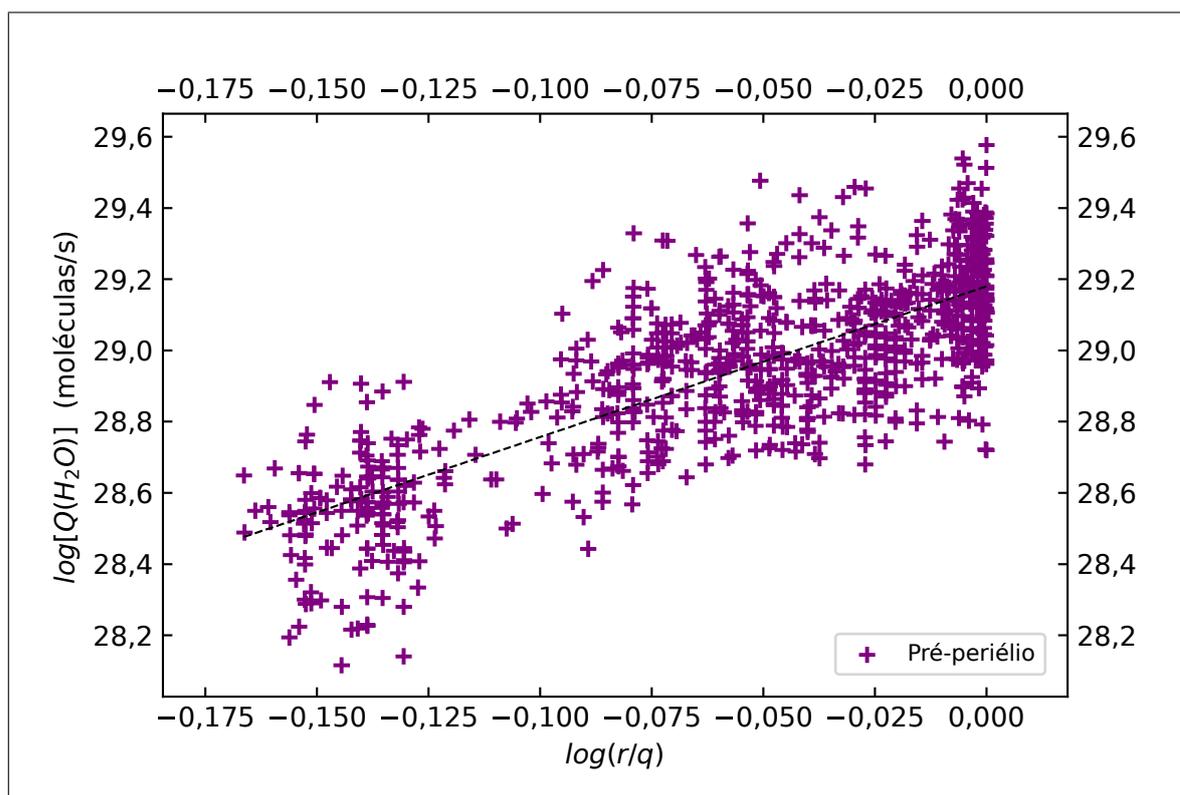


Figura 3.8: Comportamento das taxas de produção de água com a razão  $r/q$ , onde  $q = 0,951 \text{ ua}$ , durante a fase pré-periódica.

<sup>3</sup> Todas as leis de potência serão definidas de acordo com o mesmo ponto de referência, o periélio. Isto justifica os sinais negativos nas fases pré-periódicas.

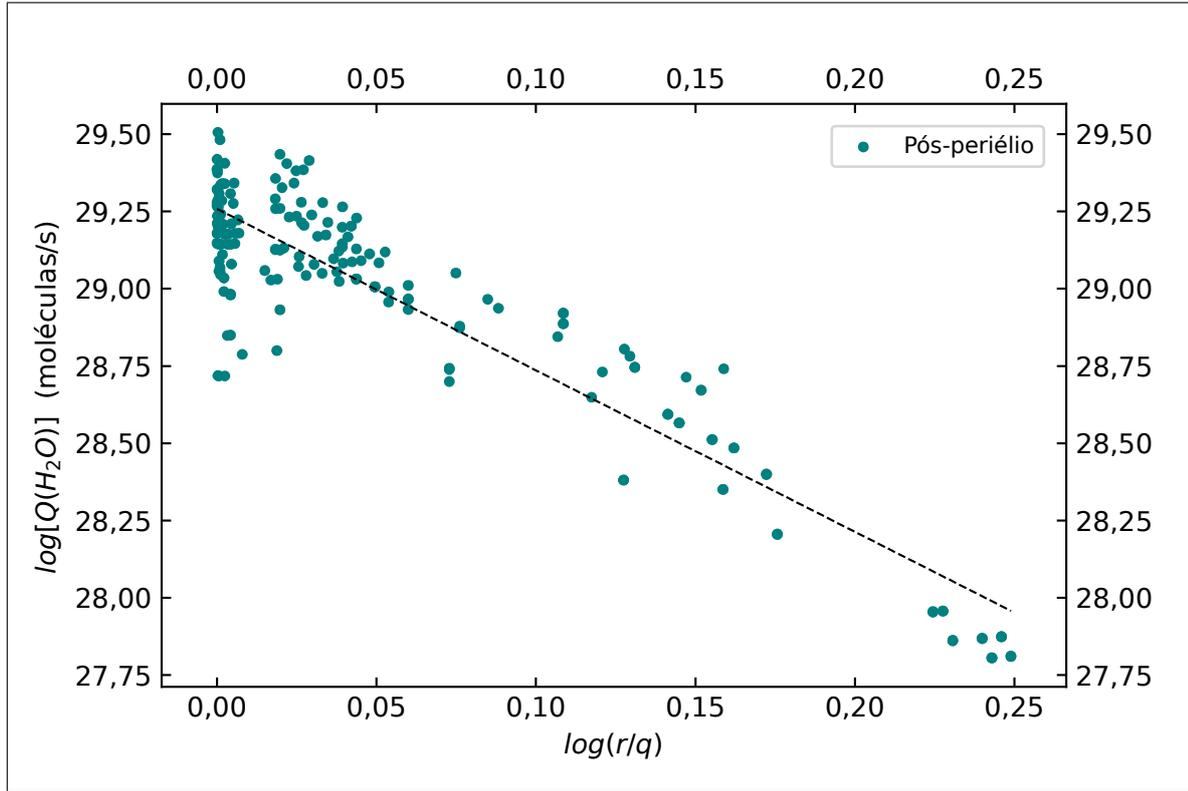


Figura 3.9: Comportamento das taxas de produção de água com a razão  $r/q$ , onde  $q = 0,951 \text{ ua}$ , durante a fase pós-periódica.

$$\text{Pré-Periélio : } \log[Q(H_2O)] = (29,18 \pm 0,01) - (4,13 \pm 0,11) \log(r_h/q^4) \quad (3.5)$$

$$\text{Pós-Periélio : } \log[Q(H_2O)] = (29,25 \pm 0,01) - (5,23 \pm 0,16) \log(r_h/q) \quad (3.6)$$

Como era de se esperar, constatamos que as taxas de produção de água crescem com o decréscimo da distância heliocêntrica durante a fase pré-periódica, e decrescem com o aumento da distância heliocêntrica na fase pós-periódica.

Os resultados observacionais pré-periódicos obtidos por [A'Hearn et al. \(1995\)](#) indicam uma produção de cerca de  $9,5 \times 10^{28}$  moléculas de água por segundo no periélio enquanto que, pela relação 3.5, o *MSEMV* fornece  $1,51 \times 10^{29}$  moléculas/s. Há, portanto, um razoável acordo entre o resultados aqui obtidos.

<sup>4</sup> Distância periódica do cometa Kohler.

Considerando, então, a produtividade do cometa no periélio, temos que a taxa de perda de água é dada por:

$$(Massa\ produzida)/s = Q(H_2O) \text{ molécula/s} \cdot MA_{\text{água}} \cdot 1,66 \times 10^{-24} \text{ g/molécula}, \quad (3.7)$$

onde  $MA_{\text{água}}$  é a massa atômica da água, com um valor de 18,015 *Da*. Assim, temos que, próximo ao periélio, o cometa Kohler teve uma perda de cerca de 5 toneladas de água por segundo.

Como vemos, as taxas de produção de água associam-se às distâncias heliocêntricas pela forma:

$$Q = Q_0 (r_h)^\gamma, \quad (3.8)$$

onde  $Q_0$  representa a taxa de produção para  $r_h = \Delta = 1 \text{ ua}$  e  $\gamma$  é um coeficiente característico da inclinação de cada classe dinâmica de cometas. Segundo a classificação estimada por [Combi et al. \(2019\)](#):

$$\begin{cases} \gamma \leq -8, & \text{para cometas OL;} \\ -8 < \gamma < -3, & \text{para cometas YL;} \\ -3 < \gamma < -1, & \text{para cometas DN.} \end{cases}$$

Daqui, determinamos os expoentes das fases pré e pós periélicas:  $-4,13$  e  $-5,23$ , com margens de erro de 0,11 e 0,16, respectivamente. Como podemos ver, estes valores para o cometa Kohler se encaixam certamente na classificação exposta acima para cometas jovens de longo período. Além disso, vemos que a fase pós periélica é mais íngreme, podendo significar certa característica da evolução cometária após sua aproximação.

### 3.3.2 Hidroxila

Sabemos que o radical hidroxila é um subproduto da fotodissociação da água. Em cometas, esse processo químico se dá com uma eficiência de 0,85 ([Huebner et al., 1992](#)). Desse modo, uma vez obtidas as taxas de produção da água através do *MSEMV*, nós usamos a relação  $Q(OH) = 0,847 \times Q(H_2O)$  para encontrar as respectivas taxas de produção deste radical.

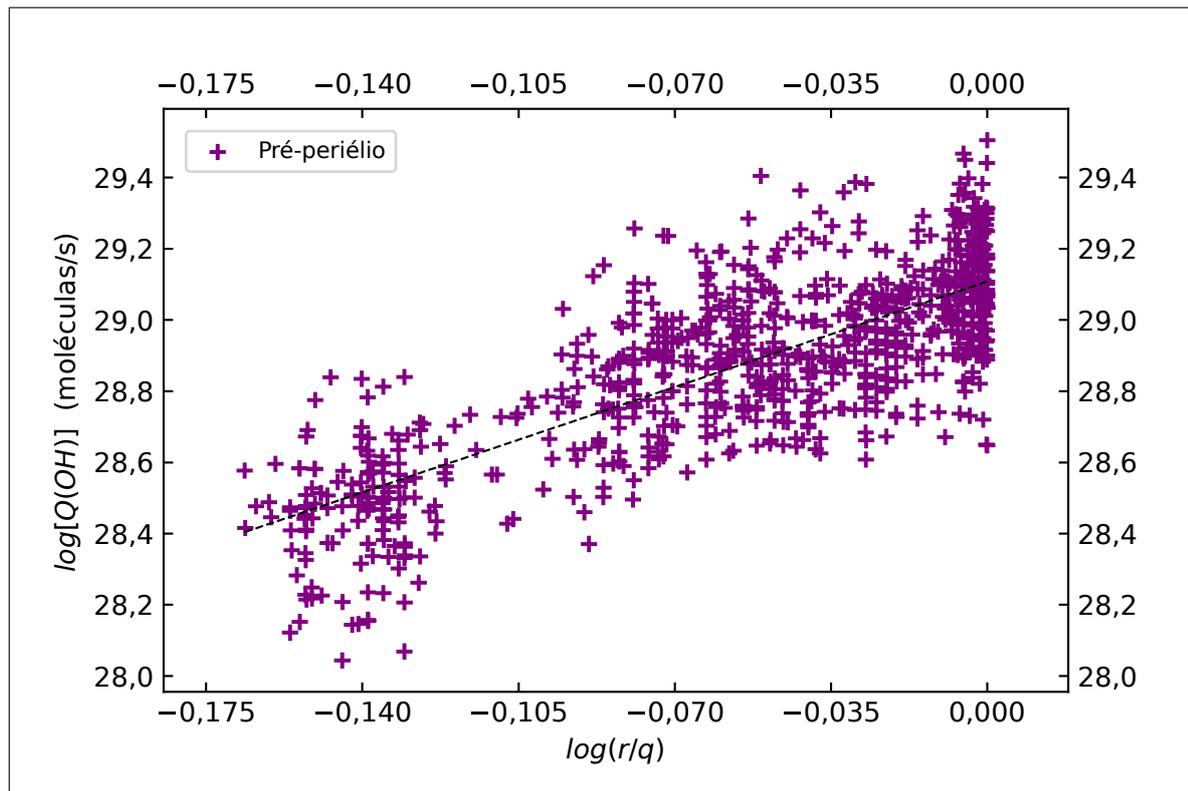


Figura 3.10: Comportamento da taxa de produção de hidroxila com a relação entre as distâncias heliocêntrica e periélica (fase-pré).

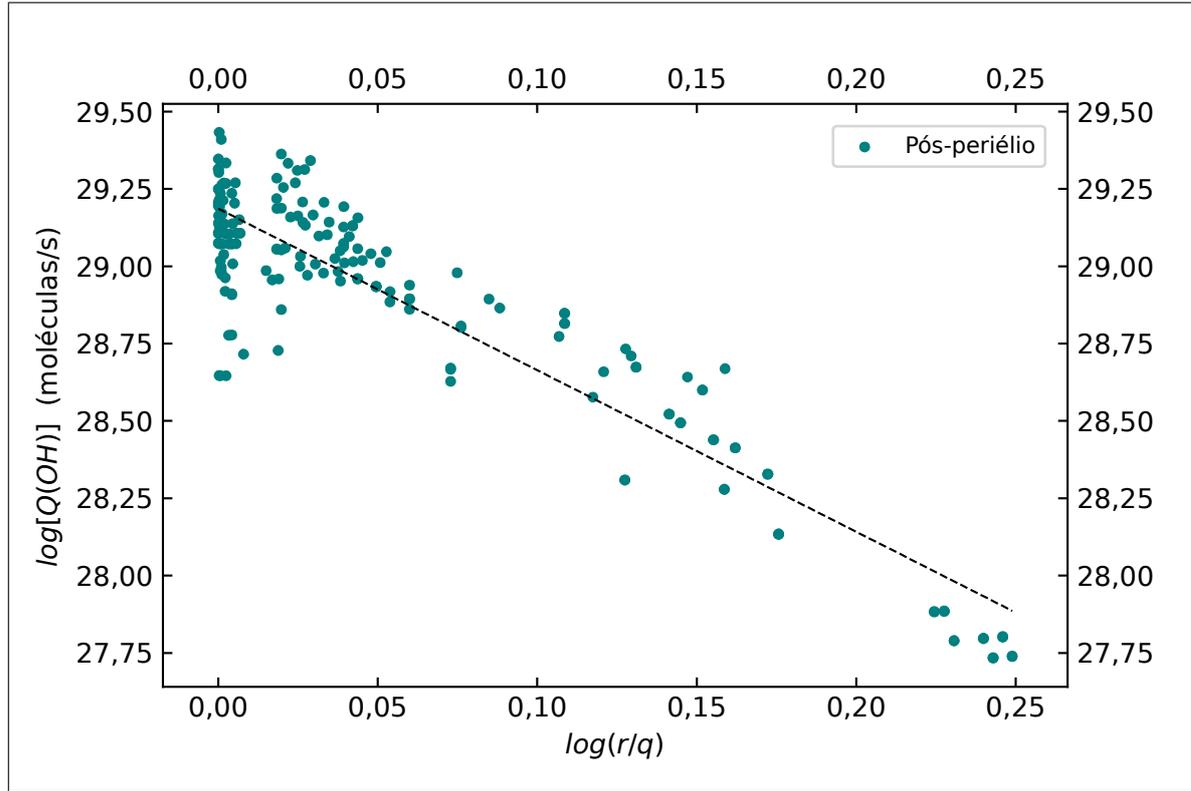


Figura 3.11: Comportamento da taxa de produção de hidroxila com a relação entre as distâncias heliocêntrica e periélica (fase-pós).

$$\text{Pré-Periélio : } \log[Q(OH)] = (29,10 \pm 0,01) - (4,22 \pm 0,11) \log(r_h/q) \quad (3.9)$$

$$\text{Pós-Periélio : } \log[Q(OH)] = (29,18 \pm 0,01) - (5,22 \pm 0,16) \log(r_h/q) \quad (3.10)$$

As figuras 3.10 e 3.11, juntamente com as leis de potências determinadas nas equações 3.9 e 3.10 com correlações de 0,72 e 0,75, respectivamente, indicam resultados importantes para nosso estudo. O pico das taxa de produção ocorreu próximo ao periélio, em 10,4(UT) de novembro de 1977, onde atinge um valor de  $3,2 \times 10^{29}$  moléculas/s. A menor produção, em 8,7 de fevereiro de 1978, apresentou uma taxa de  $5,5 \times 10^{27}$ , já na fase pós-periélica.

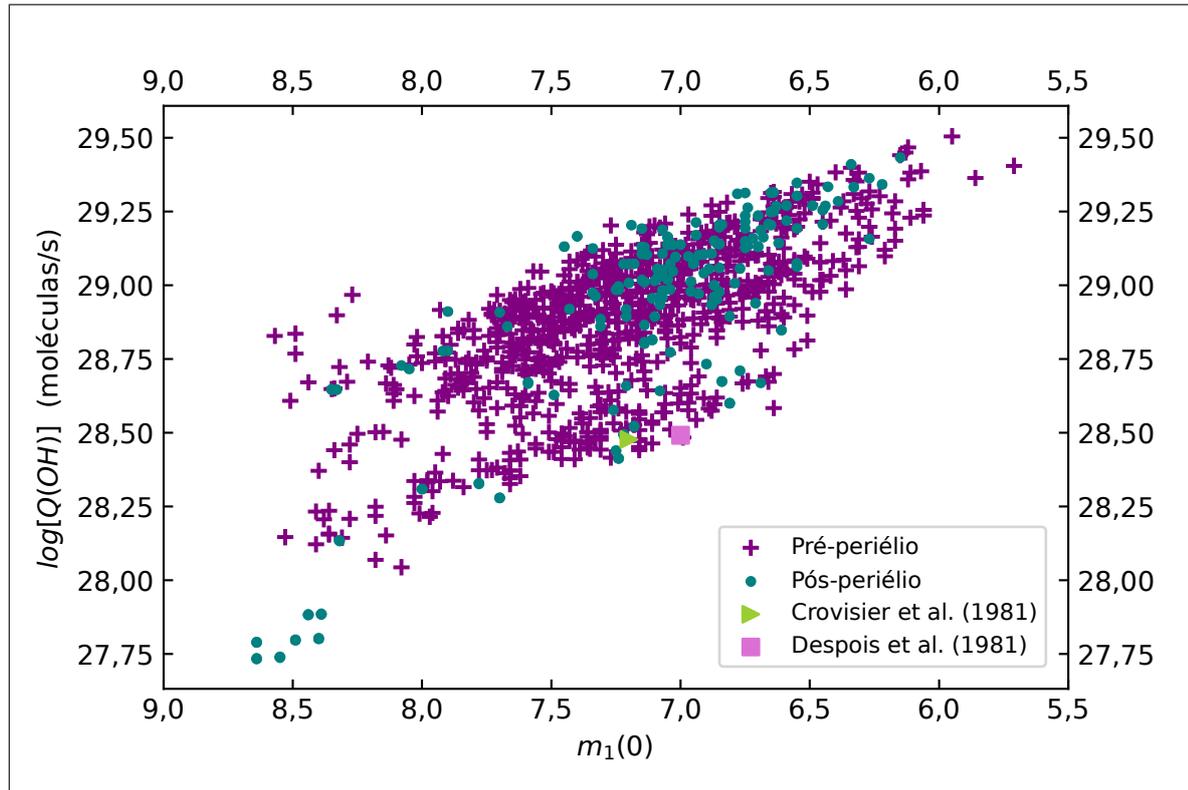


Figura 3.12: Relação entre a taxa de produção de hidroxila e a magnitude visual absoluta, comparando com resultados de observações feitas na faixa de rádio do espectro.

Considerando a magnitude visual absoluta estimada a 1 *ua* [ $m_1(0)$ ], vemos na figura 3.12 a concordância entre os resultados adquiridos pelo método *SEMV* para as taxas de produção de hidroxila com aqueles das observações realizadas em rádio ( $\lambda = 18$  *cm*) por Crovisier et al. (1981) e Despois et al. (1981), os quais indicam valores de  $\log(OH) = 0,3 \times 10^{29}$  moléculas/s e  $\log(OH) = 0,31 \times 10^{29}$  moléculas/s para  $m_1(0) = 7,0$  e  $m_1(0) = 7,2$ , respectivamente.

Unindo os comportamentos das fases pré e pós periélicas, obtemos a seguinte relação linear:

$$\log[Q(OH)] = (31,87 \pm 0,08) - (0,41 \pm 0,01) m_1(0) \quad (3.11)$$

A correlação obtida de, aproximadamente, 0,72 foi satisfatória, considerando o espalhamento causado pelas diversas condições de observação e tipos de telescópios utilizados.

### 3.3.3 Taxa de produção de gás

Como a composição total do gás cometário é, em geral, desconhecida, adotamos a estrutura do cometa 1P/Halley, considerando cerca de 90% água e 10% de gases de pesos moleculares médios de cerca de 40  $Da$  (Sanzovo et al., 1996; de Almeida et al., 2016), como citado na seção 2.4. A fim de analisar a taxa de produção total do gás, podemos, então, seguir as relações 2.28 e 2.29.

Desta forma, estimamos  $Q_g$ , como apresentado nas figuras 3.13 e 3.14.

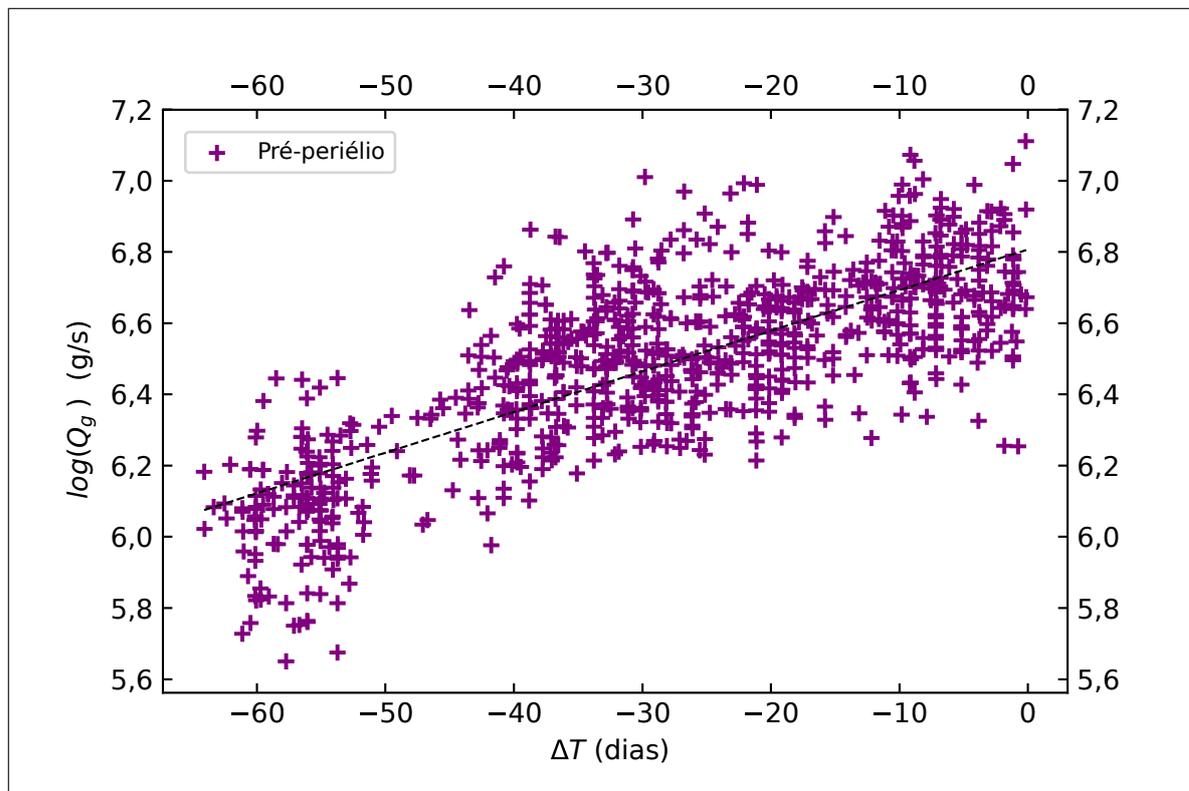


Figura 3.13: Relação entre a taxa de produção total para os gases e os dias para a fase pré-periérica.

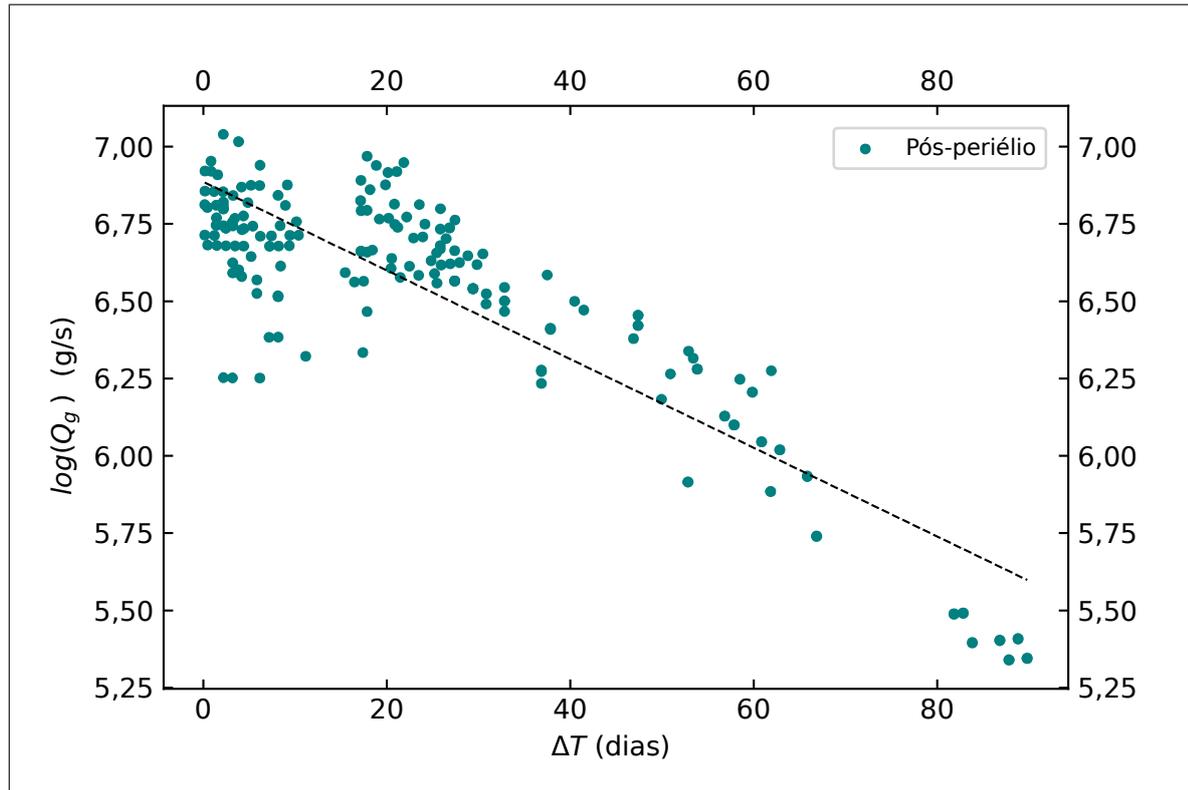


Figura 3.14: Relação entre a taxa de produção total para os gases e os dias para a fase pós-periódica.

$$\text{Pré-Periélio: } \log(Q_g) = (6,80 \pm 0,01) - (0,011 \pm 0,0003) \Delta T \quad (3.12)$$

$$\text{Pós-Periélio: } \log(Q_g) = (6,89 \pm 0,02) - (0,014 \pm 0,0005) \Delta T \quad (3.13)$$

As equações 3.12 e 3.13, referentes às atividades apresentadas nas figuras 3.13 e 3.14, revelam certa uniformidade entre as fases pré e pós periódicas para tais taxas de produção de gás de acordo com os dias ao periélio, atingindo seu máximo neste. Os índices de correlação assemelham-se àqueles da água, com 0,76 e 0,89.

Momentos antes do periélio, em 10,4(UT) de novembro de 1977, o cometa atingiu sua máxima atividade gasosa, com uma taxa de produção de gás de  $1,29 \times 10^7$  g/s. Cerca de 20 dias após a passagem periódica, entre 29 e 30 de novembro de 1977, a atividade do cometa aumentou de  $5,62 \times 10^6$  a  $1,00 \times 10^7$  g/s, representando um pequeno *burst*, causado, possivelmente, pela colisão de restos de asteróides.

Verificando todos os gráficos apresentados para as relações das taxas de produção, percebemos um maior espalhamento com a diminuição da distância heliocêntrica, indicando

variações sazonais e atividades inomogêneas na coma cometária, causando a distribuição não uniforme de insolação e, por consequência, encurtando os tempos de vida de vaporização (Murphy e Koop, 2005). Aqui, a pressão de radiação solar atinge as camadas mais internas do cometa, alongando a zona de colisão das moléculas e causando, então, o aumento da temperatura nesta região por processos adiabáticos.

### 3.3.4 Determinação do raio nuclear

Tendo estimado as taxas de produção de água, podemos determinar a área ativa ( $A_A$ ) do núcleo cometário. Isto pode ser feito levando em conta o modelo da teoria de vaporização, citada na subseção 1.2.1, da seguinte forma:

$$A_A = \frac{Q(H_2O)}{f_{AA} \cdot Z(T)}, \quad (3.14)$$

lembrando que  $Z(T)$  é a taxa de vaporização de água por área e  $f_{AA}$  é a fração de área ativa do núcleo cometário.

Considerando um regime de rotação rápida e, assim, aproximando um núcleo esfericamente simétrico, podemos relacionar a área ativa com o raio nuclear ( $R_N$ ) por:

$$\frac{A_A}{4\pi(R_N)^2} \leq 1. \quad (3.15)$$

Já para uma aproximação hemisférica, ou seja, em rotação lenta, temos:

$$\frac{A_A}{2\pi(R_N)^2} \leq 1. \quad (3.16)$$

É óbvio que, independentemente da aproximação que se escolha, a estimativa para o raio nuclear do cometa será praticamente a mesma. Nestas expressões, as taxas de vaporização da água ( $Z(T)$ ) são diferentes, o que compensa o resultado final.

No capítulo 2, nós apresentamos um modo de como se calcular o raio nuclear efetivo e mínimo do Kohler, utilizando, para isso, a aproximação hemisférica. Aqui, vamos usar a aproximação do rotor rápido para encontrar a dimensão nuclear e confrontá-la com essa aproximação.

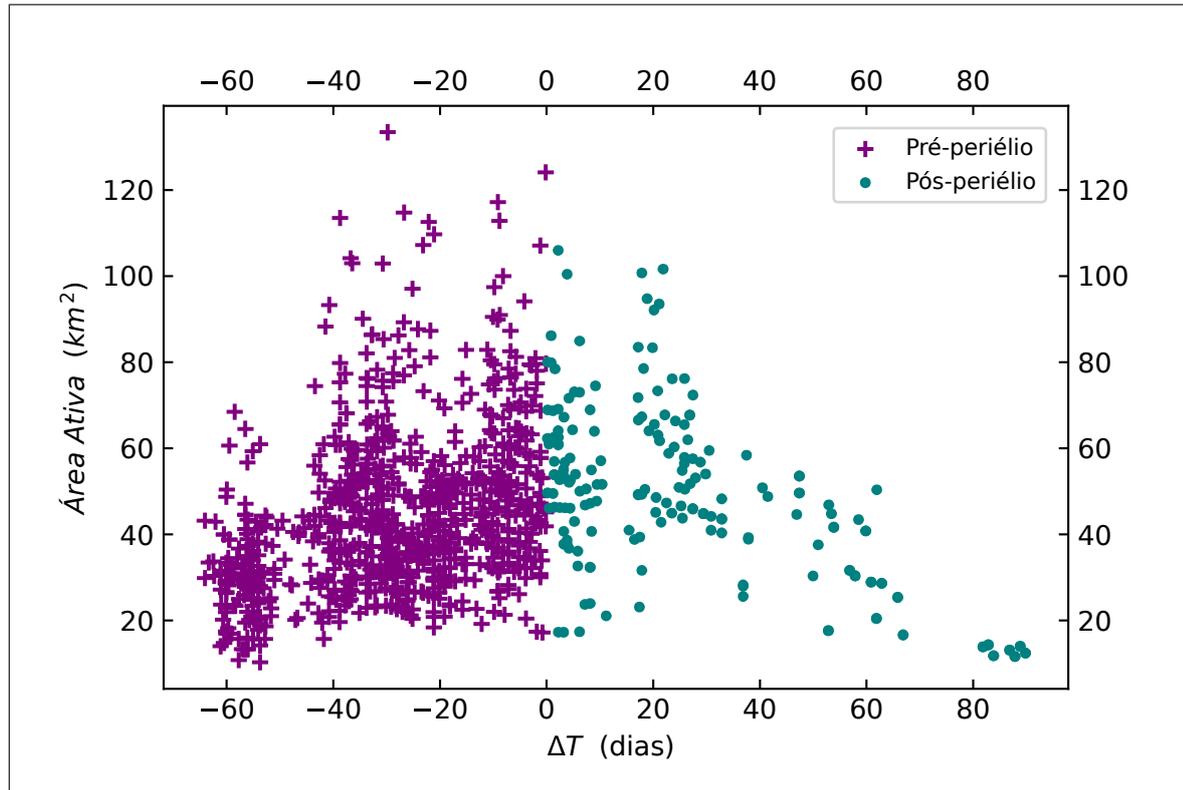


Figura 3.15: Determinando a área ativa do cometa com sua aproximação e afastamento do Sol.

A figura 3.15 indica o aumento da área ativa com a aproximação do cometa ao Sol. Nela, podemos verificar que, na fase pós-periódica, onde a lei de potência tem um coeficiente de correlação superior em comparação àquela da fase pré-periódica, o cometa Kohler alcança um valor máximo de cerca de  $106 \text{ km}^2$  (no periélio).

Sabemos que a área superficial ativa é obtida a partir da razão entre a taxa de produção de água e sua taxa de vaporização, tendo estas valores máximos de  $3,2 \times 10^{29} \text{ moléculas/s}$  e  $3,02 \times 10^{17} \text{ moléculas}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ , respectivamente, em relação ao periélio. Os valores mínimos de atividade foram atingidos após 88 dias do periélio, tendo seu mínimo à  $r = 1,8 \text{ ua}$ , com uma taxa de produção de água de  $6,4 \times 10^{27} \text{ moléculas/s}$  e  $Z(T) = 5,48 \times 10^{16} \text{ moléculas}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ . Esses valores fornecem uma fração de área ativa de 11,7 % e, por consequência, uma área superficial ativa de cerca de  $12 \text{ km}^2$ .

Utilizando a equação 3.15 e considerando que a fase pós-periódica possui menor dispersão, tendo excelente correlação linear na lei de potência entre a taxa de produção de água e a distância heliocêntrica nesta fase, obtemos, então, os comportamentos apresentados na figura 3.16.

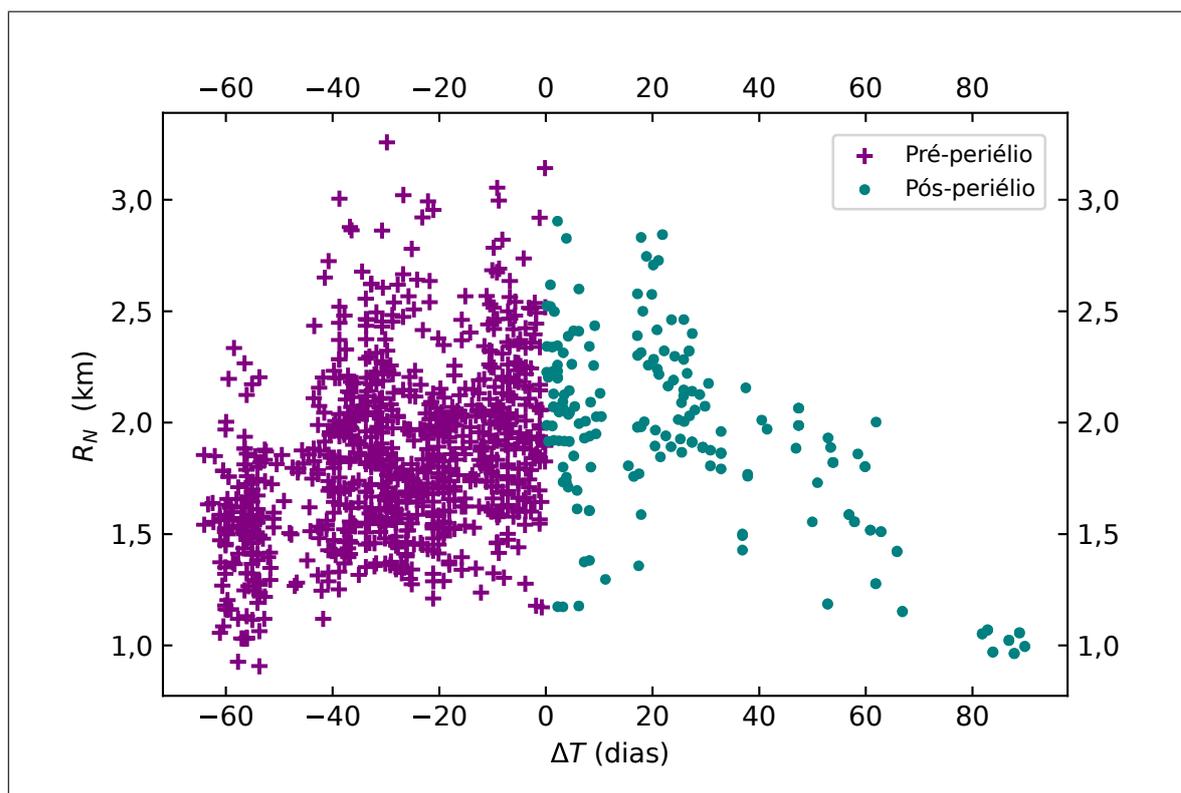


Figura 3.16: Estimativa dos raios nucleares mínimo e efetivo.

Assim, o raio mínimo para que o cometa Kohler possua a atividade apresentada é de cerca de  $0,9 \text{ km}$  e estima-se um raio nuclear de  $3,0 \text{ km}$ , um núcleo relativamente pequeno se comparado, por exemplo, ao do cometa Halley, de  $16 \text{ km}$ .

### 3.4 Comparando as taxas de produção das espécies químicas presentes no espectro do cometa

A partir do espectro apresentado na figura 2, utilizamos o modelo de Haser (seção 2.1) para obter as densidades de coluna e as taxas de produção das moléculas de  $CN(0-0)$ ,  $CN(1-1)$ ,  $C_2(0-0)$  e  $C_3$  ( $3914,5 \text{ \AA}$ ).

O número de moléculas de cada espécie em uma determinada região depende diretamente de quanto esta é produzida em determinado tempo. Assim:

$$N_i = Q_i \cdot \tau_i, \quad (3.17)$$

onde  $i$  é o fator representando cada espécie e  $Q$  é sua taxa de produção.

Considerando que existem dificuldades em determinar por certo a distribuição por toda coma, devido a dependência com o instrumento utilizado e a projeção no campo de visão no plano do céu, podemos reescrever a equação 3.17 da seguinte forma:

$$N_i = \frac{4\pi F_i}{\Omega g_i} = 6,81 \times 10^{11} \frac{F_i r^2}{g_1 \theta_s^2}, \quad (3.18)$$

onde  $\Omega$  é o ângulo sólido formado a partir da abertura da fenda do espectrógrafo no cometa,  $g_1$  é o fator de eficiência de fluorescência a 1 *ua* e  $\theta_s$  é o diâmetro de abertura circular do diafragma da projeção.

Segundo Haser (1957), as distribuições na coma esfericamente simétrica para as moléculas mãe (*parent* – *p*) e filha (*daughter* – *d*) são dadas, respectivamente, por:

$$n_p(r) = \frac{Q}{4\pi r^2 v} (e^{-r/t_p}), \quad (3.19)$$

e

$$n_d(r) = \frac{Q}{4\pi r^2 v} \frac{l_d}{l_p - l_d} (e^{-r/t_p} - e^{-r/t_d}). \quad (3.20)$$

Assim, determinando a densidade total de coluna das moléculas, integrando  $n_{p,d}$  ao longo da linha de visada, obtemos a razão entre a taxa de produção e a velocidade de ejeção das moléculas (O'dell e Osterbrock, 1962; Newburn e Spinrad, 1984; de Almeida, 1993):

$$\left[ \int_0^{\rho/l_p} K_0(y) dy - \int_0^{\rho/l_d} K_0(y) dy + \left( \frac{l_p - l_d}{S} \right) + K_1 \left( \frac{S}{l_d} \right) - K_1 \left( \frac{S}{l_p} \right) \right]^{-1} \left( \frac{Q}{v} \right) = \frac{T_s}{S} \left( \frac{l_p - l_d}{l_d} \right) \quad (mols^{-1}/kms^{-1}), \quad (3.21)$$

com  $K_0$  e  $K_1$  representando as funções de Bessel modificadas de segunda espécie de ordem 0 e 1, respectivamente, e

$$T_s \equiv \pi S^2 N = 2,81 \cdot 10^{17} \frac{F \Delta^2}{g}. \quad (3.22)$$

Dessa forma, considerando a velocidade de expansão das moléculas de *CN*, *C<sub>2</sub>* e *C<sub>3</sub>*, tomando um valor médio para *v* de (de Almeida et al., 1997):

$$v = 0,58 r_h^{-1/2} \text{ kms}^{-1}, \quad (3.23)$$

é possível estimar as taxas de produção para estas espécies.

### 3.4.1 Análise do espectro

Utilizamos os fatores de eficiência fluorescente,  $g_1$ , apropriados para os radicais  $CN$  e  $C_3$ , nas equações do modelo de Haser. No caso do cianogênio ( $CN$ ), baseamos em [Tatum \(1984\)](#), o qual leva em conta o Efeito Swings, ou seja, a dependência desse fator com a distância heliocêntrica. Para o carbono 3 ( $C_3$ ), seus valores são referenciados em [Landaberry et al. \(1991\)](#). As dimensões retangulares da abertura utilizada naquela data observacional foram transformadas em uma equivalente dimensão circular de  $3,78''$ . A tabela a seguir mostra os fluxos considerados, as densidades colunares e as taxas de produção obtidas:

Tabela 3.2 - Bandas moleculares presentes no espectro do cometa Kohler, no dia 17 de novembro de 1977, e seus respectivos valores de interesse.

Banda Molecular	Fluxo ( $erg/cm^2 \cdot s$ )	Densidade de Coluna ( $cm^{-2}$ )	Taxa de Produção (moléculas/s)
$CN$ (0-0)	$5,5333 \cdot 10^{-10}$	$3,1836 \cdot 10^{12}$	$7,4199 \cdot 10^{26}$
$CN$ (1-1)	$5,5119 \cdot 10^{-10}$	$3,1713 \cdot 10^{12}$	$7,3913 \cdot 10^{26}$
$C_3$ (0-0-0)	$8,4152 \cdot 10^{-11}$	$1,2588 \cdot 10^{11}$	$1,7445 \cdot 10^{25}$

Na data da observação do cometa Kohler, onde seu espectro foi obtido, a taxa de produção média de hidroxila, calculada através do *MSEMV*, foi de  $8.891 \cdot 10^{28}$  moléculas/s. Assim, obtemos as seguintes relações:

$$\log \left\{ \frac{Q[CN(0-0)]}{Q(OH)} \right\} = -2,08; \quad (3.24a)$$

$$\log \left\{ \frac{Q[CN(1-1)]}{Q(OH)} \right\} = -2,08; \quad (3.24b)$$

$$\log \left\{ \frac{Q[C_3(0-0-0)]}{Q(OH)} \right\} = -3,69. \quad (3.24c)$$

Estabelecendo, agora, os elementos com respeito a  $CN$ , ficamos com:

$$\log \left\{ \frac{Q[C_3(0-0-0)]}{Q[CN(0-0)]} \right\} = -1,65; \quad (3.25a)$$

$$\log \left\{ \frac{Q[C_3(0-0-0)]}{Q[CN(1-1)]} \right\} = -1,62. \quad (3.25b)$$

A partir dos resultados de sua pesquisa envolvendo 85 cometas, [A'Hearn et al. \(1995\)](#) concluíram que cometas possuem abundâncias típicas quando apresentam as seguintes abundâncias fracionais:

- $\log(C_2/CN) \geq -0,18$ ;
- $\log(CN/OH) = -2,5 \pm 0,18$ , com intervalo variando de  $-2,83$  a  $-2,17$ ;
- $\log(C_2/OH) = -2,44 \pm 0,20$ , com intervalo variando de  $-2,90$  a  $-2,10$ ;
- $\log(C_3/OH) = -3,59 \pm 0,29$ , com intervalo variando de  $-4,26$  a  $-3,09$ ;
- $\log(NH/OH) = -2,37 \pm 0,27$ , com intervalo variando de  $-2,77$  a  $-1,80$ .

Enquanto que cometas com abundâncias esgotadas são definidos por:

- $\log(C_2/CN) < -0,18$ ;
- $\log(CN/OH) = -2,69 \pm 0,14$ , com intervalo variando de  $-2,94$  a  $-2,50$ ;
- $\log(C_2/OH) = -3,30 \pm 0,35$ , com intervalo variando de  $-4,13$  a  $-2,98$ ;
- $\log(C_3/OH) = -4,18 \pm 0,28$ , com intervalo variando de  $-4,58$  a  $-3,69$ ;
- $\log(NH/OH) = -2,48 \pm 0,34$ , com intervalo variando de  $-2,94$  a  $-1,92$ .

Em relação ao cometa Kohler, [A'Hearn et al. \(1995\)](#) obtiveram os valores de  $0,24$  e  $-0,88$  para os logaritmos das razões entre as taxas de produção de  $C_2$  e  $C_3$  ( $4050 \text{ \AA}$ ) com  $CN$ , classificando-o, assim, como típico. Considerando a ausência de informações acerca da banda de Swan de  $C_2$  e da molécula de  $C_3$  na mesma região do espectro, os dados dispostos nas equações [3.24](#) e [3.25](#), se comparados aos intervalos classificatórios, não nos fornecem resultados confirmativos.

O domínio da taxa de produção de  $OH$  é evidente para pequenas distâncias heliocêntricas, considerando o início da sublimação da água para altas temperaturas. Além

disso, vemos que a emissão de  $CN$  é consideravelmente maior do que a das outras espécies, caracterizando o brilho cometário.

Os nossos resultados não são definitivos devido à informação espectral limitada fornecida na literatura para o cometa, sendo importante um intervalo maior de observações, e, também, se deve incluir os aspectos do *continuum*, indicando a taxa de produção de elementos produzida pela poeira cometária.



## Comparação dos resultados obtidos com uma amostra de cometas observada pelo satélite SOHO/*SWAN*

No capítulo anterior, nós aplicamos toda a estrutura do *MSEMV* a um conjunto de dados observacionais contendo magnitudes visuais do cometa Kohler e encontramos as taxas de produção de água (em moléculas/*s*), as taxas de produção do gás (em *g/s*) e as taxas de produção do radical *OH*, convertidas da água a partir do processo de fotodissociação. Além disso, estimamos as dimensões mínima e efetiva do cometa. Procuramos deixar claro aqui, que não há, na literatura, muitos resultados observacionais desse cometa. Por isso mesmo, neste capítulo, nós procuraremos, de forma gráfica e sucinta, comparar a produtividade do Kohler com aquela apresentada por uma pequena amostra de cometas de longo período, cujas taxas de produção de água foram obtidas a partir das análises da linha  $H_{\alpha}$ , observadas pelo satélite *SWAN*, à bordo da espaçonave *SOHO*, disponíveis em [Combi et al. \(2019\)](#).

### 4.1 Descrição da amostra escolhida

As taxas de produção de água, disponibilizadas por Combi e colaboradores, foram obtidas a partir da análise do perfil da linha de hidrogênio *Lyman* –  $\alpha$  da coma de cada cometa, como apresentado no apêndice [B](#). Este estudo representa um esforço coletivo de praticamente vinte anos de pesquisa, contabilizando 60 cometas, sendo 17 cometas de curto período, 29 cometas de longo período (velhos e jovens) e 14 cometas dinamicamente novos, provenientes da nuvem de Oort. Como forma de comparar as taxas de produção de água aqui obtidas para o Kohler pelo *MSEMV*, nós optamos pela escolha de uma amostra de 14 cometas jovens e de longo período (YL), sendo estes: C/1999 H1 (Lee),

C/1999 J3 (LINEAR), C/1999 T1 (McNaught-Hartley), C/2001 A2 (LINEAR), C/2000 WM1 (LINEAR), C/2002 X5 (Kudo-Fujikawa), C/2001 Q4 (NEAT), C/2004 Q2 (Machholz), C/2006 M4 (SWAN), C/2009 P1 (Garradd), C/2014 Q2 (Lovejoy), C/2014 Q1 (PanSTARRS), C2015 G2 (MASTER) e C/2013 X1 (PanSTARRS).

*Tabela 4.1* - As taxas de produção de água nas fases pré e pós periélicas de 14 cometas jovens e de longo período obtidas por [Combi et al. \(2019\)](#).

Cometa	Data (UT)	$q$ ( $ua$ )	Fase periélica	$\Delta r$ ( $ua$ )	$\Delta Q(H_2O)$ (moléculas/s)
C/1999 H1 (Lee)	11,1732/07/1999	0,708073	Pré	1,434 – 0,999	$(8,1 - 17,7)x10^{28}$
			Pós	1,023 – 1,483	$(11,2 - 3,7)x10^{28}$
C/1999 J3 (LINEAR)	20,1662/09/1999	0,976811	Pré	1,150 – 0,970	$(2,0 - 3,9)x10^{28}$
			Pós	0,970 – 1,420	$(4,7 - 2,4)x10^{28}$
C/1999 T1 (McNaught-Hartley)	13,4205/12/2000	1,173711	Pré	1,333 – 1,172	$(12,3 - 20,0)x10^{29}$
			Pós	1,172 – 1,523	$(15,5 - 6,2)x10^{28}$
C/2001 A2 (LINEAR)	24,5240/05/2001	0,778609	Pré	1,360 – 1,003	$(20,9 - 4,7)x10^{28}$
			Pós	1,007 – 1,414	$(9,5 - 2,7)x10^{28}$
C/2000 WM1 (LINEAR)	22,6773/12/2002	0,5531	Pré	1,214 – 0,996	$(6,4 - 8,7)x10^{28}$
			Pós	1,000 – 1,127	$(15,7 - 13,2)x10^{28}$
C/2002 X5 (Kudo-Fujikawa)	28,9761/01/2003	0,190286	Pré	1,163 – 1,015	$(4,6 - 9,1)x10^{28}$
			Pós	1,017 – 1,341	$(6,3 - 1,5)x10^{28}$
C/2001 Q4 (NEAT)	15,9546/05/2004	0,961886	Pré	1,401 – 0,991	$(26,9 - 54,9)x10^{28}$
			Pós	1,004 – 1,753	$(29,8 - 8,7)x10^{28}$
C/2004 Q2 (Machholz)	24,9190/01/2005	1,205709	Pré	2,396 – 1,207	$(4,7 - 39,9)x10^{28}$
			Pós	1,206 – 2,126	$(32,8 - 3,5)x10^{28}$
C/2006 M4 (SWAN)	28,7295/09/2006	0,783008	Pré	1,608 – 0,783	$(2,7 - 35,9)x10^{28}$
			Pós	0,783 – 1,745	$(59,3 - 2,6)x10^{28}$
C/2009 P1 (Garradd)	23,6776/12/2011	1,550537	Pré	-	-
			Pós	1,551 – 1,746	$(23,7 - 9,9)x10^{28}$
C/2014 Q2 (Lovejoy)	30,0781/01/2015	1,290484	Pré	1,426 – 1,291	$(17,8 - 66,0)x10^{28}$
			Pós	1,291 – 1,750	$(88,4 - 24,9)x10^{28}$
C/2014 Q1 (PanSTARRS)	06,5128/07/2015	0,314557	Pré	1,189 – 0,992	$(2,7 - 4,5)x10^{28}$
			Pós	-	-
C/2015 G2 (MASTER)	23,8022/05/2015	0,779772	Pré	1,159 – 0,999	$(3,1 - 4,4)x10^{28}$
			Pós	1,000 – 1,014	$(7,1 - 6,8)x10^{28}$
C/2013 X1 (PanSTARRS)	20,7226/04/2016	1,314254	Pré	1,338 – 1,314	$(10,7 - 44,1)x10^{28}$
			Pós	1,314 – 1,742	$(16,9 - 2,2)x10^{28}$
C/1977 R1 (Kohler)	01/11/1977	0,990576	Pré	1,452 – 0,991	$(3,0 - 15,1)x10^{28}$
			Pós	0,991 – 1,758	$(17,8 - 0,9)x10^{28}$

Na tabela 4.1, nós disponibilizamos parâmetros importantes referentes a cada um desses objetos e incluímos o cometa Kohler no sentido de facilitar a comparação entre suas taxas de produção de água e as dos demais cometas da amostra. Dessa forma, nas três primeiras colunas aparecem a denominação, a data de referência da passagem pelo periélio e a distância periélica  $q$  (em  $ua$ ), respectivamente. Nas colunas 4 e 5 mostramos a fase observacional e o intervalo de distância heliocêntrica  $\Delta r$  (em  $ua$ ), com relação às observações realizadas. Finalmente, na última coluna, aparecem os intervalos de  $Q(H_2O)$  obtidos por Combi et al. (2019), para fins de comparação com os respectivos intervalos, para o Kohler, encontrados neste trabalho pela aplicação do *MSEMV*. É importante esclarecer que as taxas de produção de água não estão diretamente associadas aos intervalos de distância heliocêntrica extremos. O melhor exemplo disso é a taxa de produção máxima da amostra, obtida pelo cometa C/2014 Q2, 22 dias após a passagem do cometa pelo periélio. Combi e colaboradores também disponibilizam os principais parâmetros orbitais para cada um dos cometas da amostra escolhida. No entanto, esses parâmetros não foram incorporados na tabela, simplesmente, porque nosso maior interesse é comparar as taxas de produção de água aqui obtidas com aquelas de cada cometa da amostra.

## 4.2 Análise da produtividade dos cometas e a comparação com o cometa Kohler

Estão dispostos na figura 4.1 os comportamentos dos 14 cometas citados na tabela 4.1. Não houve a necessidade de se fazer uma restrição quanto aos intervalos de distância heliocêntrica na amostra e, assim, aproveitamos em totalidade os resultados das imagens em Lyman- $\alpha$  obtidos por Combi et al. (2019), ou seja, todas as taxas de produção de água obtidas por estes pesquisadores aparecem incorporadas. É importante ressaltar que não estamos utilizando nenhuma lei de potência obtida para cada um dos objetos da amostra, uma vez que as distâncias heliocêntricas associadas às taxas de produção de água obtidas através do TRM (apêndice B), não eram exatamente coincidentes com aquelas do cometa Kohler. Aqui, não levamos em conta a dimensão de cada objeto em si, tão somente a taxa de produção de água.

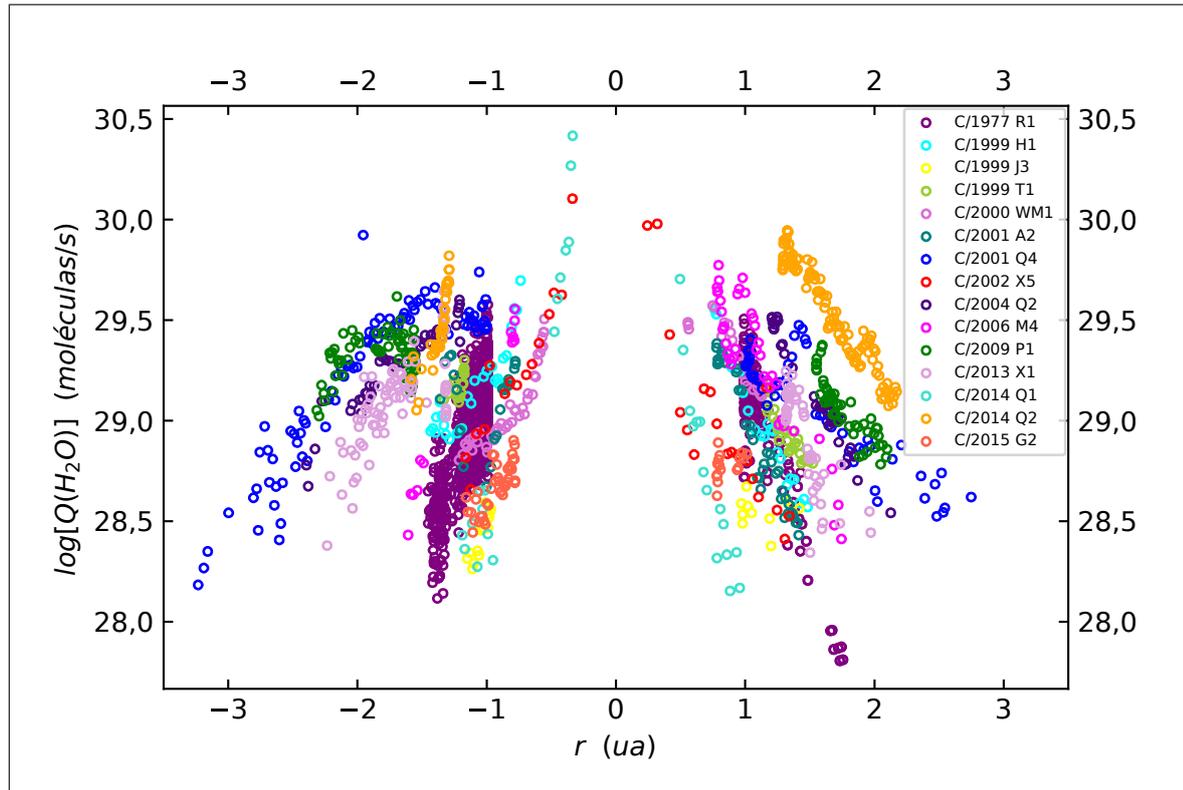


Figura 4.1: A variação da taxa de produção de água com a distância heliocêntrica e a comparação entre cometas jovens e de longo período (YL) (Combi et al., 2019) e o C/1977 R1 (Kohler).

Fica evidente que os cometas C/2014 Q2, C/2006 M4 e C/2001 Q4 são os mais produtivos de toda a amostra, tendo a perda de 26,4, 17,7 e 16,4 toneladas de água por segundo nas proximidades do periélio, respectivamente. Assim, considerando que o cometa Kohler produz, aproximadamente, 5 toneladas de água por segundo nestas condições, temos que estes cometas sofrem maiores taxas de sublimação (ou fotodissociação) em ordens de 3 a 5 vezes maior.

Em relação a todos os objetos, o cometa Kohler também é menos produtivo que o C/1999 J3 (na fase pré-periódica), o C/2004 Q2, o C/2001 A2, o C/1999 T1, o C/2013 X1 e o C/2001 Q4, sendo, porém, mais produtivo que o C/2014 Q1, o C/1999 J3 e tão produtivo quanto o C/2001 A2 na fase pós-periódica. Deste modo, considerando os objetos da amostra aqui selecionada, podemos dizer que o cometa Kohler é um cometa jovem de longo período, que apresenta uma produtividade na forma de água que pode ser considerada de baixa a mediana. Isso pode ser explicado por seu núcleo de pequena dimensão, com raio de, aproximadamente, 3,0 km.

## Conclusões e perspectivas

A intensidade de brilho cometário observada, convertida em taxas de produção de  $H_2O$  utilizando o *MSEMV*, e, por consequência, em taxas de produção de gás e hidroxila (como descrito no capítulo 2.4), é útil para se estudar a atividade de cometas, particularmente quando há poucas informações (ou a falta destas) derivadas da espectroscopia óptica e/ou quando o cometa é observado apenas em comprimentos de onda de rádio, como é o caso do Cometa Kohler.

Ao usufruirmos das estimativas de magnitude visual obtidas a partir de observações sistemáticas, disponibilizadas nas bibliotecas das associações ICQ (International Comet Quarterly), BAA (Reino Unido), ALPO (EUA), DCV/NKV (Países Baixos), REA (Brasil) e VdS (Alemanha) e encontradas na plataforma COBS (Comet Observation Database), o método permitiu uma comparação com as taxas de produção obtidas a partir de observações do radical OH em  $\lambda = 18\text{ cm}$ , realizadas no radiotelescópio Nançay por [Despois et al. \(1981\)](#), os quais examinaram o cometa Kohler durante as fases pré e pós-periélicas, entre os dias 21 de outubro e 30 de novembro de 1977 e obtiveram uma taxa de produção de OH de  $0,31 \times 10^{29}$  moléculas/s para uma magnitude total  $m_1(0) = 7,0$ . Um resultado muito semelhante de  $0,3 \times 10^{29}$  moléculas/s, para  $m_1(0) = 7,2\text{ mag}$ , foi encontrado por [Crovisier et al. \(1981\)](#) em 4 de novembro de 1977. Da nossa figura 3.12, e, também, para uma magnitude total  $m_1(0) = 7,2\text{ mag}$ , nós encontramos  $5,5 \times 10^{28}$  moléculas/s, estando em boa concordância com esses autores. A pequena discrepância é justificada pelo uso de diferentes técnicas de observação, tipos de instrumentos utilizados e observadores na determinação das magnitudes visuais. Também, um conjunto de 7 observações foram realizadas na fase pré-periélica por [A'Hearn et al. \(1995\)](#), os quais obtiveram uma taxa (máxima) de produção de água de cerca de  $9,5 \times 10^{28}$  moléculas/s no periélio.

Os principais resultados deste trabalho estão dispostos a seguir:

- a. Obtenção das leis de potência envolvendo as taxas de produção de água, do gás total e do radical hidroxila. Na fase pré-periélica, a taxa de produção de água variou com  $r^{-4,13 \pm 0,11}$ , enquanto que na fase pós-periélica temos  $r^{-5,23 \pm 0,16}$ . No periélio, o cometa produziu cerca de  $1,5 - 1,7 \times 10^{29}$  moléculas/s, ou equivalente a  $5 \text{ ton/s}$  de água;
- b. Inicialmente, utilizamos uma aproximação hemisférica para a rotação cometária (ver capítulo 2) e acoplamos esta, juntamente com o modelo do núcleo esférico e o valor canônico do albedo de  $p = 0,04$ , à equação fotométrica do modelo de vaporização da água, na intenção de analisar as dimensões nucleares. No Capítulo 3, realizamos esse mesmo procedimento para o modelo da esfera. Chegamos à conclusão que, independentemente do modelo adotado (hemisfério totalmente iluminado ou esfera), os resultados são, praticamente, os mesmos: o cometa possui um raio efetivo da ordem de  $3,0(\pm 1,5) \text{ km}$  e raio nuclear mínimo de  $\sim 0,9(\pm 0,45) \text{ km}$ . A imprecisão nos resultados está associada, principalmente, aos cálculos das taxas de produção de água e ao albedo nuclear adotado. Verificamos também que, distante do periélio, para  $r \sim 1,8 \text{ ua}$ , uma fração de área superficial ativa mínima da ordem de 10 a 11% é necessária para explicar a taxa de produção de água sublimada pelo cometa;
- c. Comparamos as taxas de produção de água do cometa Kohler aqui obtidas (utilizando o *MSEMV*) com àquelas de 14 cometas jovens de longo período (YL), analisadas por [Combi et al. \(2019\)](#) a partir da aplicação do modelo *TRM* com base em observações de linha Lyman- $\alpha$  nos espectros cometários. Os resultados indicam uma produtividade de baixa a mediana para o cometa Kohler em comparação com os demais objetos selecionados de mesma classe dinâmica. Isto pode estar associado à sua pequena dimensão nuclear, justificando, talvez, o pouco interesse de observação deste cometa pelos astrônomos profissionais da comunidade científica internacional.

Caminhamos, enfim, para as perspectivas deste trabalho, referentes à expansão do estudo em outros cometas observados no Sistema Solar.

Cometas de longos períodos possuem a característica de conservar seu material primitivo devido à pouca interação com gradientes térmicos ou gravitacionais, como já dito anteriormente. Porém, isto se difere do quão maior for seu semi-eixo maior, ou seja, de

---

quão próximo dos limites do Sistema Solar o cometa estiver, daí vem a importância de compreender como se dá o comportamento desses corpos dependendo de seu local de origem, fazendo uma discussão crítica sobre as diferentes classes dinâmicas, considerando os velhos de longo período (OL), os jovens de longo período (YL) e os dinamicamente novos (DN), e suas propriedades físicas. Alguns resultados preliminares estão apresentados, graficamente, no apêndice [C](#).

No Apêndice [A](#), apresentamos os resultados preliminares da aplicação do *MSEMV* para o cometa de curto-período (SP - *Short Period*) 46P/Wirtanen, comparando-o, também, aos dados dispostos na literatura, incluindo o próprio trabalho de [Combi et al. \(2019\)](#).



## Referências Bibliográficas

- A'Hearn M., Millis R., Birch P., Gas and dust in some recent periodic comets, *The Astronomical Journal*, 1979, vol. 84, p. 570
- A'Hearn M., Millis R., Birch P., Photometry of Comet Bradfield 1979I.. In *Bulletin of the American Astronomical Society* , vol. 12, 1980, vol. 12, p. 730
- A'Hearn M. F., Birch P. V., Feldman P. D., Millis R. L., Comet Encke: Gas production and lightcurve, *Icarus*, 1985, vol. 64, p. 1
- A'Hearn M. F., Millis R. C., Schleicher D. G., Osip D. J., Birch P. V., The ensemble properties of comets: Results from narrowband photometry of 85 comets, 1976-1992, *Icarus*, 1995, vol. 118, p. 223
- Alfvén H., Lindblad B., Granulation, magneto-hydrodynamic waves, and the heating of the solar corona, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1947, vol. 107, p. 211
- Biermann L., Brosowski B., Schmidt H., The interaction of the solar wind with a comet, *Solar Physics*, 1967, vol. 1, p. 254
- Bobrovnikoff N. T., Observation of the Brightness of Comets, *Popular Astronomy*, 1941, vol. 49, p. 467
- Bobrovnikoff N. T., On systematic errors in the photometry of comets, *Perkins Obs.*, 1943, vol. 19
- Boehnhardt H., Delahodde C., Sekiguchi T., Tozzi G., Amestica R., Hainaut O., Spyromilio

- J., Tarenghi M., West R., Schulz R., et al., VLT observations of comet 46P/Wirtanen, *Astronomy & Astrophysics*, 2002, vol. 387, p. 1107
- Carussi A., Valsecchi G., Dynamical evolution of short-period comets, *Publ. Astron. Inst. Czechosl. Acad. Sci*, 1987, pp 21–28
- Cochran A. L., Another look at abundance correlations among comets, *The Astronomical Journal*, 1987, vol. 93, p. 231
- Combi M., Boyd Z., Lee Y., Patel T., Bertaux J.-L., Quémerais E., Mäkinen J., SOHO/SWAN observations of comets with small perihelia: C/2002 V1 (NEAT), C/2002 X5 (Kudo–Fujikawa), 2006 P1 (McNaught) and 96P/Machholz 1, *Icarus*, 2011, vol. 216, p. 449
- Combi M., Mäkinen J., Bertaux J.-L., Quémerais E., Ferron S., Fougere N., Water production rate of Comet C/2009 P1 (Garradd) throughout the 2011–2012 apparition: Evidence for an icy grain halo, *Icarus*, 2013, vol. 225, p. 740
- Combi M., Mäkinen T. T., Bertaux J.-L., Quémerais E., Ferron S., A survey of water production in 61 comets from SOHO/SWAN observations of hydrogen Lyman-alpha: Twenty-one years 1996–2016, *Icarus*, 2019, vol. 317, p. 610
- Combi M. R., Mäkinen J. T. T., Bertaux J.-L., Quémerais E., Temporal deconvolution of the hydrogen coma: II. Pre-and post-perihelion activity of Comet Hyakutake (1996 B2), *Icarus*, 2005, vol. 177, p. 228
- Combi M. R., Smyth W. H., Monte Carlo particle-trajectory models for neutral cometary gases. I-Models and equations., *The Astrophysical Journal*, 1988a, vol. 327, p. 1026
- Combi M. R., Smyth W. H., Monte Carlo particle trajectory models for neutral cometary gases. II. The spatial morphology of the Lyman-alpha coma, *The Astrophysical Journal*, 1988b, vol. 327, p. 1044
- Cowan J. J., A’Hearn M. F., Vaporization of comet nuclei: light curves and life times, *The Moon and the Planets*, 1979, vol. 21, p. 155

- Crovisier J., Despois D., Gerard E., Irvine W. M., Kazes I., Robinson S., Schloerb F., A search for the 1.35-cm line of H<sub>2</sub>O in comets Kohler/1977 XIV/and Meier/1978 XXI, *Astronomy and Astrophysics*, 1981, vol. 97, p. 195
- de Almeida A., Gas and dust release from comet West (1976VI) nuclear fragments, *Earth, Moon, and Planets*, 1993, vol. 60, p. 69
- de Almeida A., Boice D., Andreazza C., de Araújo L., Formation of the CF radical in comets. In *Journal of Physics: Conference Series* , vol. 1365, 2019, vol. 1365, p. 012001
- de Almeida A., Boice D. C., Picazzio E., Huebner W. F., Water outburst activity in Comet 17P/Holmes, *Advances in Space Research*, 2016, vol. 58, p. 444
- de Almeida A., Sanzovo G., Singh P., Misra A., Torres R. M., Boice D., Huebner W., On the relationship between visual magnitudes and gas and dust production rates in target comets to space missions, *Advances in Space Research*, 2007, vol. 39, p. 432
- de Almeida A., Singh P., Huebner W., Water release rates, active areas, and minimum nuclear radius derived from visual magnitudes of comets—an application to comet 46P/Wirtanen, *Planetary and space science*, 1997, vol. 45, p. 681
- Delsemme A.-H., Chemical composition of cometary nuclei. In *Comets* (L. L. Wilkening, Ed.) Univ. of Arizona Press, Tucson , 1982, pp 85–130
- Delsemme A.-H., Swings P., Hydrates de gaz dans les noyaux cométaires et les grains interstellaires. In *Annales d’Astrophysique* , vol. 15, 1952, vol. 15, p. 1
- Despois D., Gérard E., Crovisier J., Kazes I., The OH radical in comets-Observation and analysis of the hyperfine microwave transitions at 1667 MHz and 1665 MHz, *Astronomy and Astrophysics*, 1981, vol. 99, p. 320
- Divine N., A simple radiation model of cometary dust for P/Halley. In *The Comet Halley. Dust and Gas Environment* , vol. 174, 1981, vol. 174
- Dones L., Weissman P. R., Levison H. F., Duncan M. J., Oort cloud formation and dynamics. In *Star Formation in the Interstellar Medium: In Honor of David Hollenbach* , vol. 323, 2004, vol. 323, p. 371

- Farnham T. L., Kelley M. S., Knight M. M., Feaga L. M., First Results from TESS Observations of Comet 46P/Wirtanen, *The Astrophysical Journal Letters*, 2019, vol. 886, p. L24
- Festou M. C., The density distribution of neutral compounds in cometary atmospheres. I-Models and equations, *Astronomy and Astrophysics*, 1981, vol. 95, p. 69
- Fink U., Hicks M. P., Fevig R. A., Production rates for the Stardust mission target: 81P/Wild 2, *Icarus*, 1999, vol. 141, p. 331
- Haser L., Distribution d'intensité dans la tête d'une comète, *BSRSL*, 1957, vol. 43, p. 740
- Hayes D., An absolute spectrophotometric calibration of the energy distribution of twelve standard stars, *The Astrophysical Journal*, 1970, vol. 159, p. 165
- Hendrie M., Keitch G., Comet Kohler 1977 XIV, *Journal of the British Astronomical Association*, 1981, vol. 91, p. 3
- Huebner W. F., Keady J. J., Lyon S., , 1992 in , Solar photo rates for planetary atmospheres and atmospheric pollutants. Springer pp 1–289
- Ip W.-H., Fernandez J., On dynamical scattering of Kuiper Belt Objects in 2: 3 resonance with Neptune into short-period comets., *Astronomy and Astrophysics*, 1997, vol. 324, p. 778
- Keller H., Meier R., A cometary hydrogen model for arbitrary observational geometry, *Astronomy and Astrophysics*, 1976, vol. 52, p. 273
- Kuiper G. P., On the origin of the solar system, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1951, vol. 37, p. 1
- Lamy P. L., Toth I., Fernández Y. R., Weaver H. A., et al., The sizes, shapes, albedos, and colors of cometary nuclei, *Comets II*, 2004, vol. 1, p. 223
- Landaberry S., Singh P. D., de Freitas Pacheco J., Ground-based observations of comets Giacobini-Zinner (1984e) and Hartley-Good (19851), *Astronomy and Astrophysics*, 1991, vol. 246, p. 597
- McCracken C. W., Brown L. W., Hobbs R. W., *IAUC*, 1977, vol. 3118, p. 2

- Mäkinen J. T. T., Bertaux J.-L., Combi M. R., Quémerais E., Water production of Comet C/1999 S4 (LINEAR) observed with the SWAN instrument, *Science*, 2001, vol. 292, p. 1326
- Mäkinen J. T. T., Combi M. R., Temporal deconvolution of the hydrogen coma I. A hybrid model, *Icarus*, 2005, vol. 177, p. 217
- Marsden B. G., Green D. W., Comets in 1977, *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, 1985, vol. 26, p. 81
- Morris C. S., On aperture corrections for comet magnitude estimates, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1973, vol. 85, p. 470
- Murphy D. M., Koop T., Review of the vapour pressures of ice and supercooled water for atmospheric applications, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*, 2005, vol. 131, p. 1539
- Newburn R., Spinrad H., Spectrophotometry of 17 comets. I-The emission features, *The Astronomical Journal*, 1984, vol. 89, p. 289
- Newburn R., Spinrad H., Spectrophotometry of 25 comets-Post-Halley updates for 17 comets plus new observations for eight additional comets, *The Astronomical Journal*, 1989, vol. 97, p. 552
- Ney E., Optical and infrared observations of bright comets in the range 0.5 micrometers to 20 micrometers, *Comets*, 1982, pp 323–340
- O'dell C., Osterbrock D., Emission-Band and Continuum Photometry of Comet Seki (1961f), *The Astrophysical Journal*, 1962, vol. 136, p. 559
- Oort J. H., et al., The structure of the cloud of comets surrounding the Solar System and a hypothesis concerning its origin, *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*, 1950, vol. 11, p. 91
- Osip D. J., Schleicher D. G., Millis R. L., Comets: Groundbased observations of spacecraft mission candidates, *Icarus*, 1992, vol. 98, p. 115

- Randall C., Schleicher D., Ballou R., Osip D., Observational constraints on molecular scalelengths and lifetimes in comets. In *Bulletin of the American Astronomical Society* , vol. 24, 1992, vol. 24, p. 1002
- Sanzovo G., de Almeida A., Misra A., Torres R. M., Boice D., Huebner W., Mass-loss rates, dust particle sizes, nuclear active areas and minimum nuclear radii of target comets for missions STARDUST and CONTOURP, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2001, vol. 326, p. 852
- Sanzovo G., Singh P. D., Huebner W., Dust colors, dust release rates, and dust-to-gas ratios in the comae of six comets., *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 1996, vol. 120, p. 301
- Schleicher D., Millis R., Tholen D., Hammel H., Piscitelli J., Lark N., Birch P., Martin R., The variability of Comet Halley during the 1985/1986 apparition. In *Bulletin of the American Astronomical Society* , vol. 19, 1987, vol. 19, p. 879
- Schmidt H., Wegmann R. H., WF, & Boice, DC 1988, *Comp. Phys. Comm*, 1988, vol. 49, p. 17
- Stern S. A., Shull J. M., Brandt J. C., Evolution and detectability of comet clouds during post-main-sequence stellar evolution, *Nature*, 1990, vol. 345, p. 305
- Swamy K. K., *Physics of comets*. World Scientific, 2010
- Tatum J., Cyanogen radiance/column-density ratio for comets calculated from the Swings effect, *Astronomy and Astrophysics*, 1984, vol. 135, p. 183
- Torres R. M., *Taxas de perda de massa em cometas periódicos*, Universidade de São Paulo, 2000, Tese de Doutorado
- Weidenschilling S., The origin of comets in the solar nebula: A unified model, *Icarus*, 1997, vol. 127, p. 290
- Whipple F. L., Comets. In *Cosmic Dust* (J.A.M. McDonnell, Ed.), Wiley, New York , 1978, pp 1–73
- Whipple F. L., The rotation of cometary nuclei. In *Comets* (L. L. Wilkening, Ed.), Univ. of Arizona Press, Tucson , 1985, pp 227–250

# Apêndice



## O Cometa Wirtanen

O cometa 46P/Wirtanen é um interessante alvo para o estudo de suas taxas de produção de gás devido a seu comportamento hiperativo, tendo variações bruscas em seu brilho durante suas altas intesidades.

Neste estudo, trataremos das passagens deste cometa nos anos de 1986, 1991, 1997, 2002, 2008 e 2018/2019, considerando os dados de magnitude que a base de dados retirada do *COBS* nos fornece. Para formação desta, utilizamos as bibliotecas das associações *ALPO*, *BAA*, *DCV/NKV*, *ICQ*, *OCV*, *REA-UBA*, *SAAF*, *SMPH*, *SOK/COk*, *URSA*, *VdS* e *VVS*.

Os elementos orbitais de interesse para estudo do cometa Wirtanen estão apresentados na tabela A.1 e foram retirados, também, das plataformas *JPL* da NASA e *Minor Planet Center* da IAU. Também, a base de dados empregada está disposta na tabela A.2.

Tabela A.1 - Elementos orbitais do cometa 46P/Wirtanen.

Elemento	1986	1991	1997	2002	2008	2018
Época [dias julianos]	2446508.64	2448520.1255	2450521.6499	2452513.24585	2454499.0005	2458465.44146
Excentricidade, $e$	0.652011	0.652242	0.656748	0.6578402	0.658083	0.658759
Eixo semi-maior, $a$ [ua]	3.1168869	3.1151361	3.0990914	3.0943746	3.0932544	3.092704
Periélio, $q$ [ua]	1.084642	1.083306	1.063769	1.061704	1.057548	1.055355
Inclinação, $i$ [°]	11.6792	11.6820	11.7226	11.7384	11.7394	11.7475
Longitude do nó ascendente, $\Omega$ [°]	82.3363	82.2930	82.2051	82.1724	82.1735	82.1576
Argumento do periélio, $\omega$ [°]	356.0650	356.1687	356.3418	356.3994	356.3478	356.3410
Período orbital, $P$ [anos]	5.50	5.50	5.46	5.44	5.44	5.44

Tabela A.2 - Dados observacionais para o Comet 46P/Wirtanen.

Data do periélio	q [ua]	Período Observacional (Data UT) $\Delta r$	Fase Observacional	N <sup>1</sup>	$m_v$ <sup>2</sup> [mag]
Mar. 19.14, 1986	1.085	Jan. 28.14, 1986 a Mar. 12.42, 1986 $1.088 \leq r(\text{ua}) \leq 1.266$	pré-periélio	20	9.2
		Mar. 28.12, 1986 a Mai. 11.10, 1986 $1.091 \leq r(\text{ua}) \leq 1.496$	pós-periélio	21	8.5
Set. 20.6255, 1991	1.083	Ago. 08.45, 1991 a Set. 20.35, 1991 $1.083 \leq r(\text{ua}) \leq 1.222$	pré-periélio	73	9.1
		Set. 21.12, 1991 a Dez. 16.54, 1991 $1.083 \leq r(\text{ua}) \leq 1.540$	pós-periélio	83	9.3
Mar. 14.1499, 1997	1.064	Jul. 09.7, 1996 a Mai. 31.88, 1997 $1.064 \leq r(\text{ua}) \leq 2.813$	pré-periélio	129	8.5
		Mar. 26.75, 1997 a Mai. 31.88, 1997 $1.077 \leq r(\text{ua}) \leq 1.467$	pós-periélio	109	9.2
Ago. 26.74, 2002	1.059	Ago. 11.006, 2002 a Ago. 21.07, 2002 $1.086 \leq r(\text{ua}) \leq 1.105$	pré-periélio	25	10.1
		Set. 04.38, 2002 a Dez. 12.02, 2002 $1.090 \leq r(\text{ua}) \leq 1.746$	pós-periélio	63	7.9
Fev. 02.50, 2008	1.057	Nov. 03.42, 2007 a Fev. 01.96, 2008 $1.058 \leq r(\text{ua}) \leq 1.566$	pré-periélio	118	8.2
		Fev. 02.74, 2008 a Mai. 09.91, 2008 $1.058 \leq r(\text{ua}) \leq 1.621$	pós-periélio	201	8.0
Dez. 12.93, 2018	1.055	Ago. 17.06, 2018 a Dez. 12.89, 2018 $1.161 \leq r(\text{ua}) \leq 1.796$	pré-periélio	378	3.8
		Dez. 12.97, 2018 a Abr. 07.87, 2019 $1.055 \leq r(\text{ua}) \leq 1.779$	pós-periélio	356	3.7

## A.1 Curva de Luz

Partiremos, agora, para o detalhamento das curvas de luz das 6 passagens analisadas para o cometa Wirtanen, como indicado nas figuras [A.1](#) e [A.2](#).

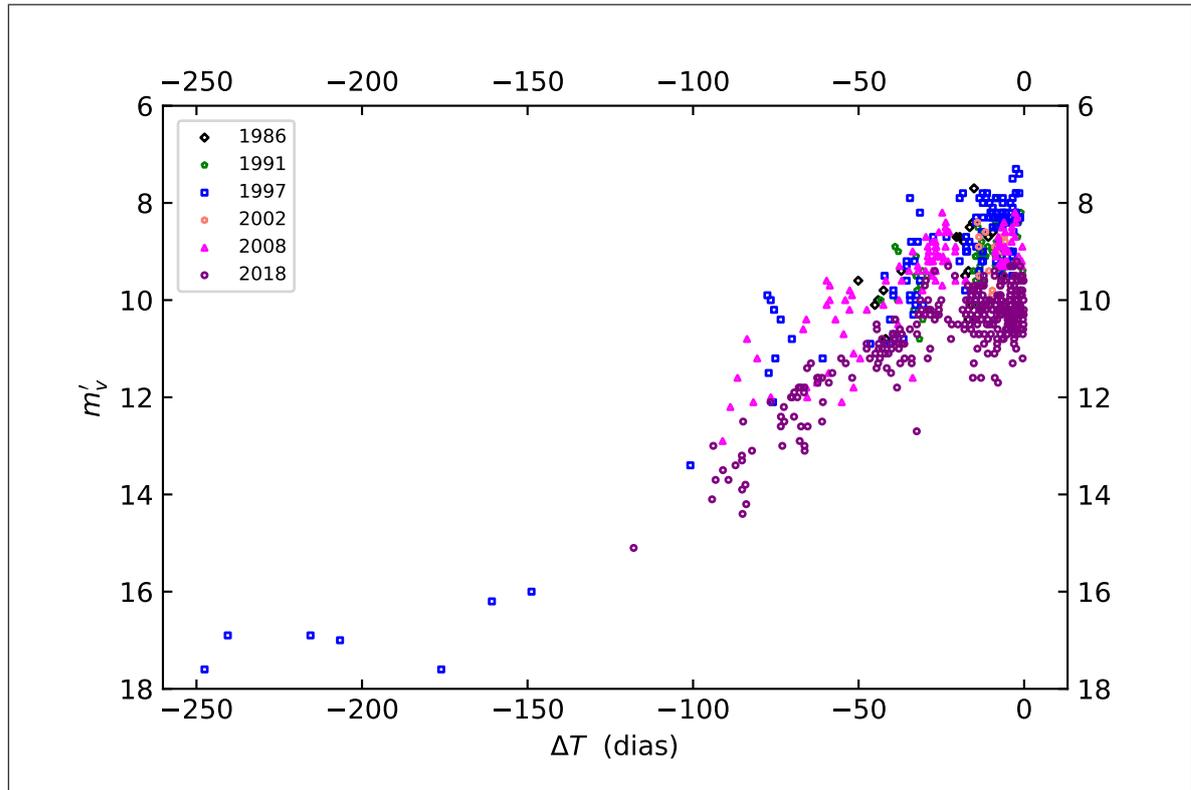


Figura A.1: Variação temporal da magnitude visual do Cometa Wirtanen para diferentes passagens - fase pré.

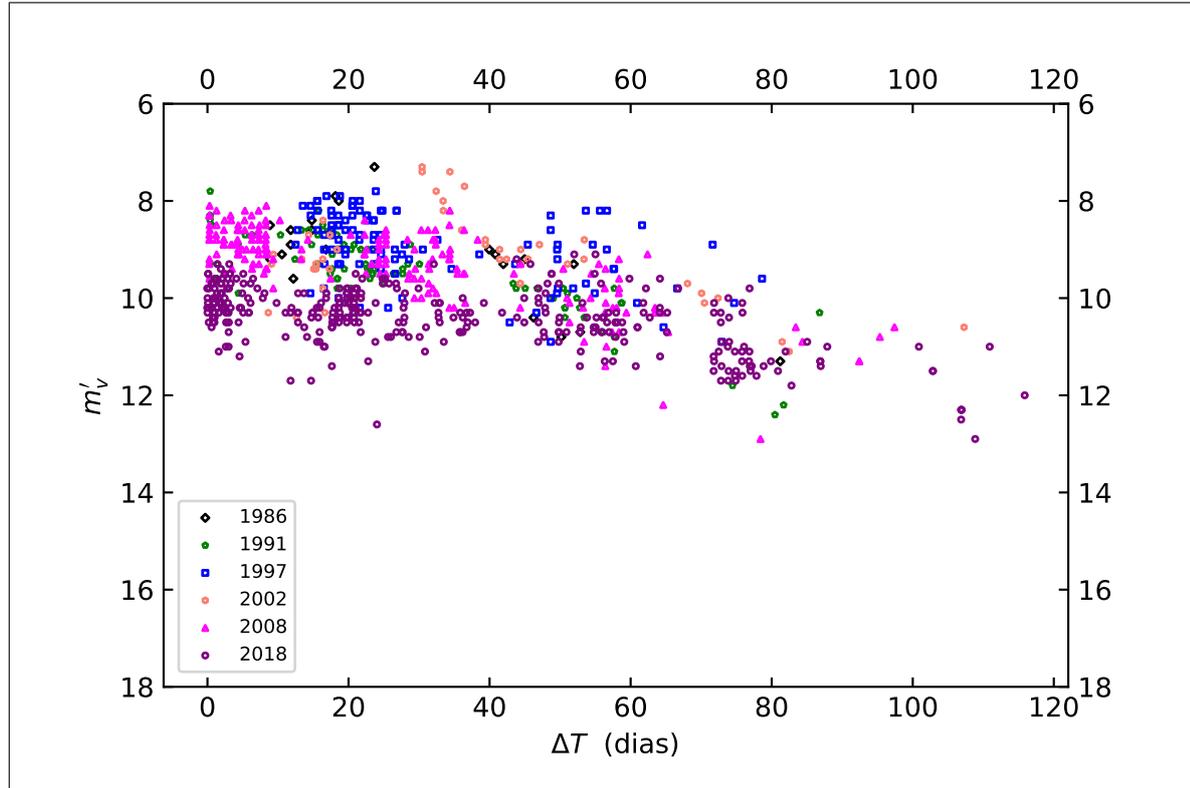


Figura A.2: Variação temporal da magnitude absoluta do Cometa Wirtanen para diferentes passagens - fase pós.

Podemos observar que o pico do brilho do cometa decresce a cada passagem. Em 1991, a magnitude máxima foi de 7,3, 23,67 dias depois do periélio. Em 1986, o maior valor foi de 9,2, 2,22 dias antes do periélio. Porém, por se tratar de um cometa hiperativo, devemos observar, com cuidado, cada desvio de alta atividade cometária, o que tende a aumentar, consideravelmente, a magnitude. Isto será discutido na próxima seção.

## A.2 As taxas de produção de água e suas variações com a hiperatividade do cometa

Tendo determinado o comportamento do brilho cometário e aplicando o método SEMV para determinação da taxa de produção de água nas diferentes passagens do cometa, iniciamos o tratamento dos dados que demonstrarão os diferentes períodos de atividade. Verificamos, assim, as figuras A.3 e A.4.

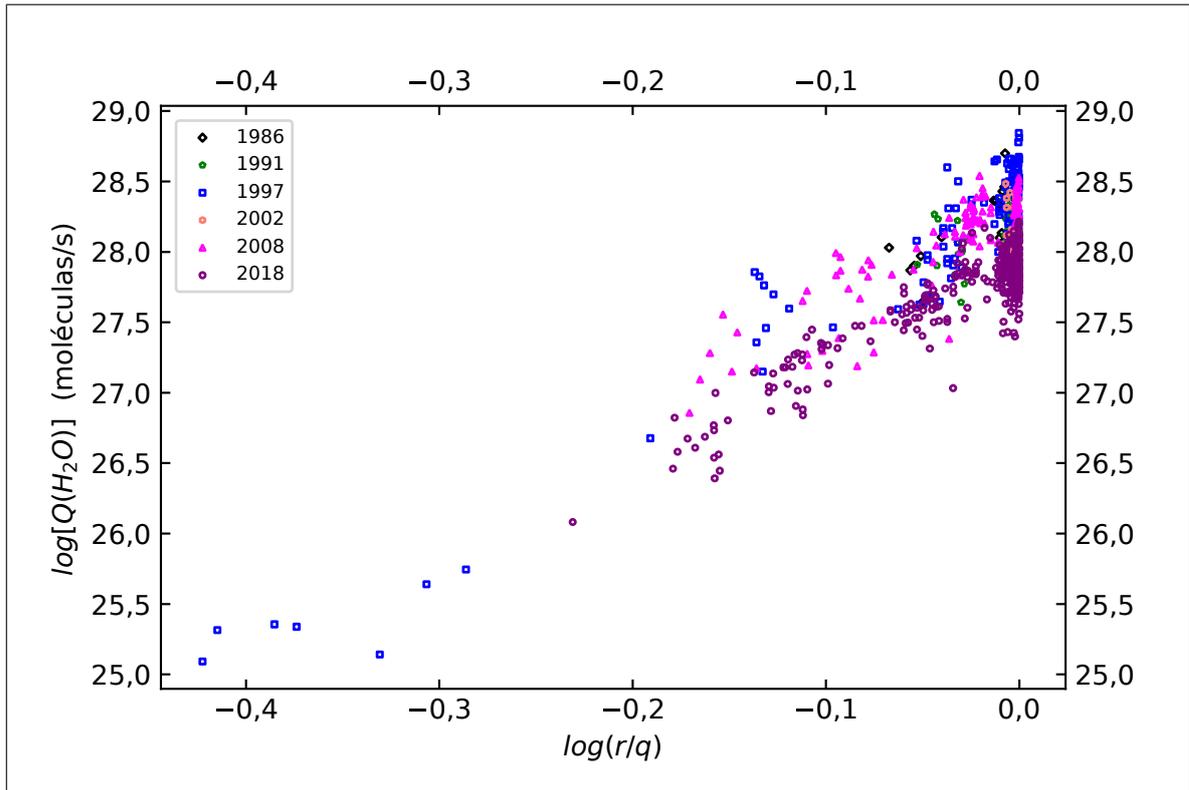


Figura A.3: Variação da taxa de produção de água com a distância heliocêntrica do cometa Wirtanen para diferentes passagens - fase pré.

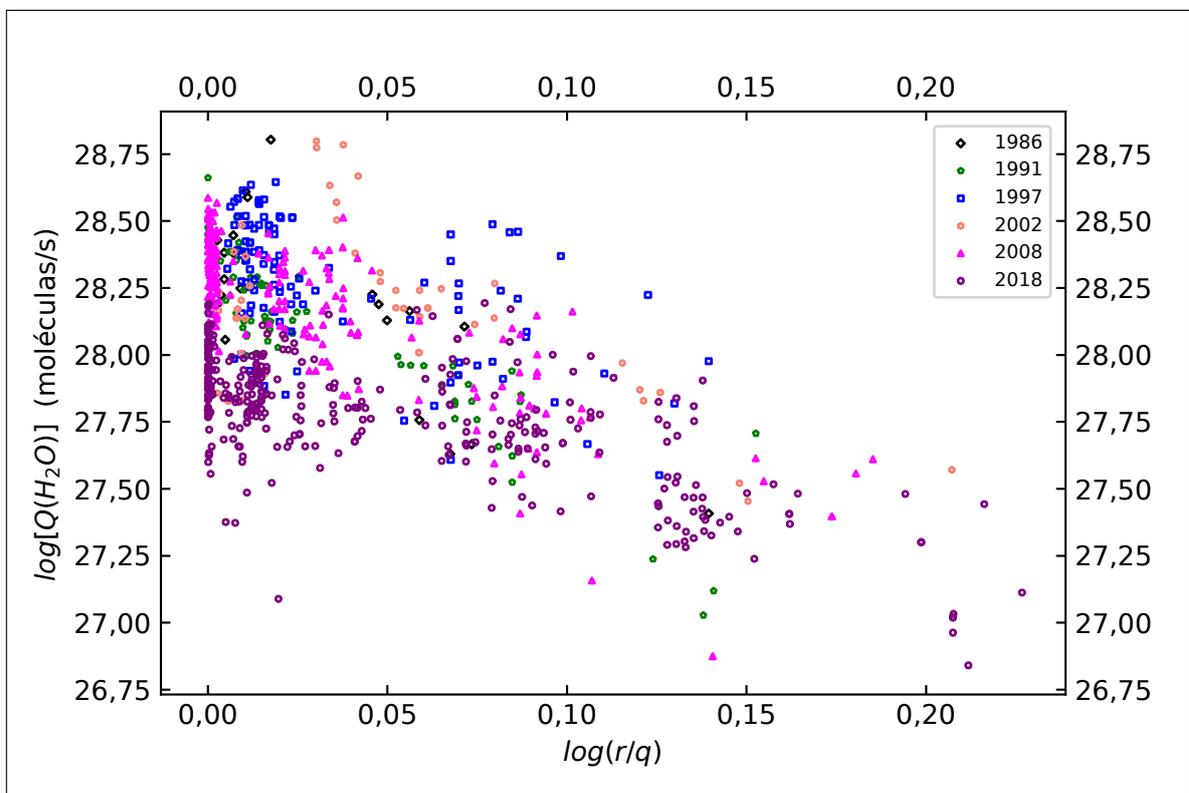


Figura A.4: Variação da taxa de produção de água com a distância heliocêntrica do cometa Wirtanen para diferentes passagens - fase pós.

O comportamento difuso, observado na fase pós-periélica do cometa, pode ser justificado por mudanças sazonais e pelo resultado da pressão de radiação solar incidente na superfície. Com diferentes passagens, a erosão do material nuclear, causada pelos diferentes gradientes de temperatura que esta sofre e os efeitos de marés, procedidos das interações gravitacionais com maiores corpos, tendem a modificar as atividades físicas e químicas do cometa, provocando, também, a diminuição da quantidade de espécies sublimadas na coma. Isto é visível a cada queda do pico da taxa de produção de água e pode ser comparado com comportamento do cometa Kohler (ver figuras 3.8 e 3.9), o qual apresenta menos difusão se compararmos as fases pré e pós periélicas.

### A.2.1 Detecção de *outbursts*

A atividade hiperativa do cometa é representada, principalmente, pela presença de *outbursts*. Detalharemos, aqui, sua presença ou ausência em cada passagem.

- 1986

A distribuição difusa da taxa de produção de água com a distância heliocêntrica apresentada na figura A.5, para a passagem de 1986, nos impede de definir algum possível *outburst* e caracterizar bem o comportamento. As linearizações indicadas nas equações A.1 e A.2 possuem coeficientes de 0,55 e 0,60, respectivamente.

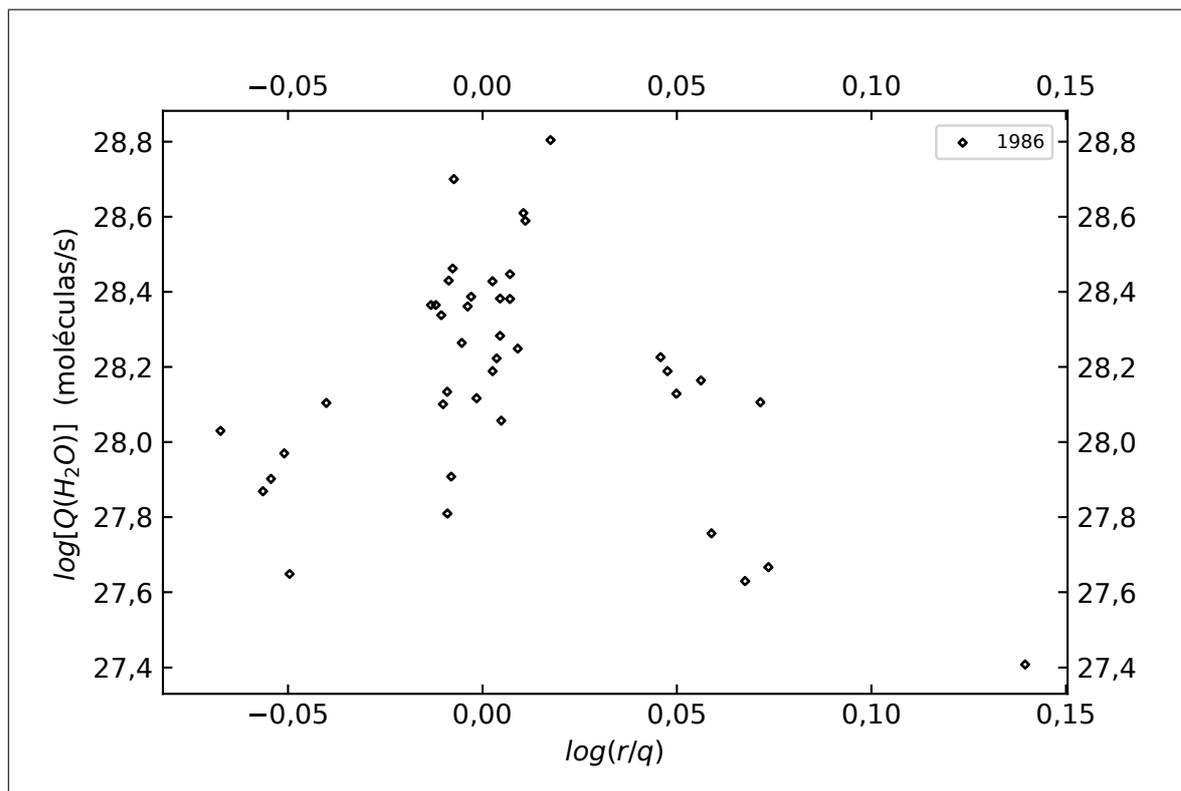


Figura A.5: O comportamento da taxa de produção de água para o cometa Wirtanen na passagem de 1986.

$$\text{Pré-Periélio : } \log[Q(H_2O)] = (28,32 \pm 0,069) - (7,22 \pm 2,27) \log(r_h/q) \quad (\text{A.1})$$

$$\text{Pós-Periélio : } \log[Q(H_2O)] = (28,43 \pm 0,06) - (7,47 \pm 1,35) \log(r_h/q) \quad (\text{A.2})$$

O pico para a taxa de produção de água, com  $6.3715 \times 10^{28}$  moléculas/s, ocorreu em 11,92 de abril, 23,67 dias após a passagem periélica.

Nessa passagem, não visualizamos alguma presença de *outbursts*.

- 1991

Neste ano, os dados disponíveis nos forneceram uma melhor amostra para análise. O pico da taxa de produção ocorreu em 12 de setembro, atingindo um valor de  $2,9262 \times 10^{28}$  moléculas/s.

Na figura A.6, cerca de 16 e 30 dias após o periélio ( $\log(r/q) \approx 0,008$  e  $\log(r/q) \approx 0,02$ ), vemos um aumento brusco na taxa de produção, podendo ser o indicativo de outbursts,

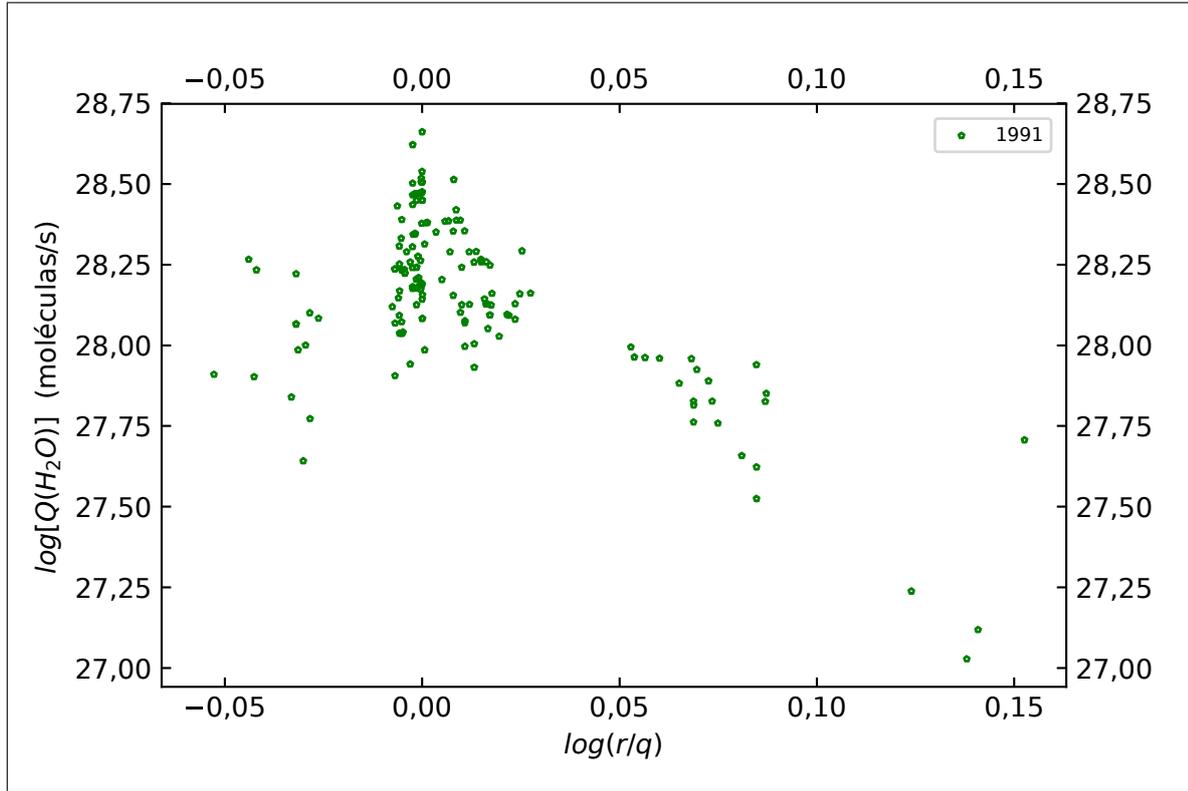


Figura A.6: O comportamento da taxa de produção de água para o cometa Wirtanen na passagem de 1991.

com magnitudes crescendo de 9,3 a 8,2 *mag* e 9,5 a 8,9 *mag*, respectivamente, em poucas horas.

As equações A.3 e A.4 apresentam correlações de 0,57 e 0,80, respectivamente, demonstrando uma melhor distribuição na fase pós-periélica.

$$\text{Pré-Periélio : } \log[Q(H_2O)] = (28,29 \pm 0,02) - (8,15 \pm 1,43) \log(r_h/q) \quad (\text{A.3})$$

$$\text{Pós-Periélio : } \log[Q(H_2O)] = (28,30 \pm 0,02) - (6,97 \pm 0,45) \log(r_h/q) \quad (\text{A.4})$$

- 1997

A figura A.7 apresenta o comportamento durante a passagem de 1997, onde podemos observar um possível outburst em  $\log(r/q) \approx -0,14$ , 76 dias antes do periélio, com magnitudes aumentando em 0,5 *mag*.

Em 11 de março, a taxa de produção atingiu seu valor máximo de  $6.9751 \times 10^{28}$  moléculas/s.

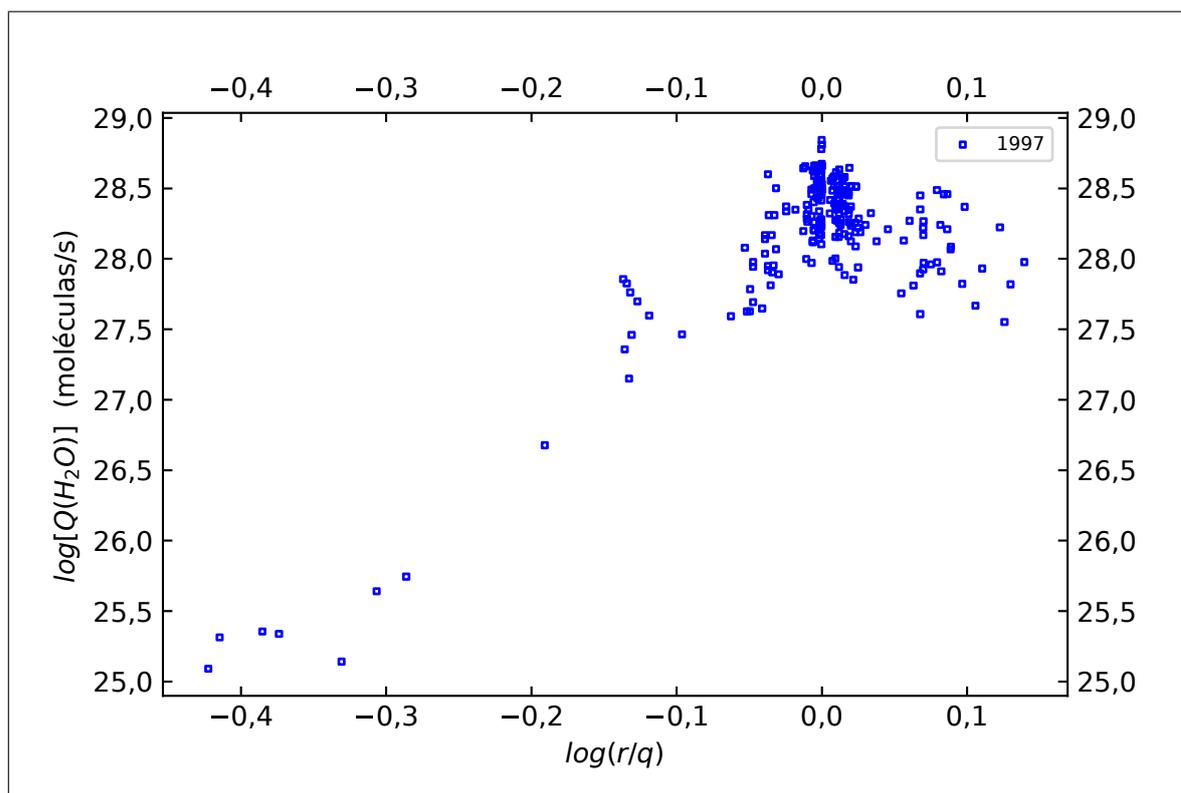


Figura A.7: O comportamento da taxa de produção de água para o cometa Wirtanen na passagem de 1997.

A linearidade da fase pré-periódica apresenta valores de confiança, com 0,70 de correlação. Na fase pós, diminui para 0,51.

$$\text{Pré-Periélio : } \log[Q(H_2O)] = (28,45 \pm 0,02) - (8,36 \pm 0,22) \log(r_h/q) \quad (\text{A.5})$$

$$\text{Pós-Periélio : } \log[Q(H_2O)] = (28,43 \pm 0,06) - (7,47 \pm 1,35) \log(r_h/q) \quad (\text{A.6})$$

- 2002

Novamente, em 2002, a estrutura indicada na figura A.8 é difusa, não tendo sido possível obter linearizações satisfatórias para o comportamento. Como justificativa interessante para isto, podemos pensar em como estaria a interação da pressão de radiação solar com o cometa naquela situação. Observando o ciclo solar <sup>3</sup>, vemos um período de alta em

<sup>3</sup> <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>.

sua atividade, com pico chegando a cerca de 200 manchas solares, o que pode ter causado uma distribuição inhomogênea da incidência de radiação e, por consequência, na condução de calor pelas partes internas do núcleo, causando diferentes graus de sublimação da molécula de água.

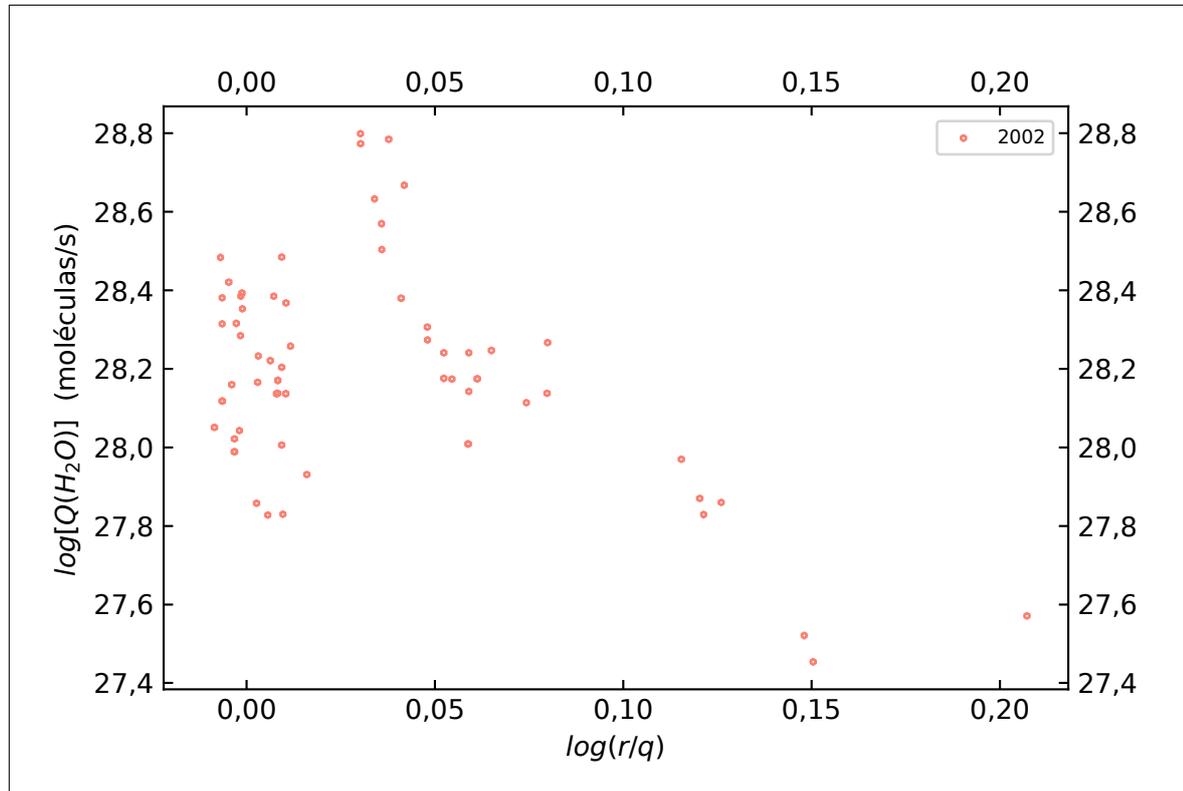


Figura A.8: O comportamento da taxa de produção de água para o cometa Wirtanen na passagem de 2002.

Entre 22 e 30 dias após o periélio, no intervalo de  $0,02 \leq \log(r/q) \leq 0,03$ , a ausência de dados dificultou a observação correta do crescimento da curva, porém, é visível que a magnitude e, por consequência, a taxa de produção de água sofrem um aumento considerável. A definição correta de um *outburst* necessitaria de maiores informações, porém, é esperado que, nessa região, mais próximo de  $\log(r/q) = 0,03$  tenha ocorrido esta atividade.

O pico da taxa de produção de água ocorreu em 26 de setembro, atingindo  $6.2955 \times 10^{28}$  moléculas/s.

- 2008

Com o aumento das observações realizadas para o cometa Wirtanen e, por consequência, de nossa base de dados, foi possível obter melhores relações para o comportamento das

taxas de produção de água com a distância periélica (fig. A.9). As equações A.7 e A.8 possuem índices de 0,78 e 0,73, respectivamente.

O maior valor para a taxa de produção de água foi de  $3.8624 \times 10^{28}$  moléculas/s, em 2 de fevereiro, logo após o periélio.

A ausência de dados na região final analisada, entre 60 e 100 dias após o periélio, dificulta a interpretação, mas uma grande queda, seguida de um aumento de magnitude e taxa de produção de água pode, também, estar apresentando uma alta atividade de *outbursts*. Infelizmente, não podemos definir com certeza.

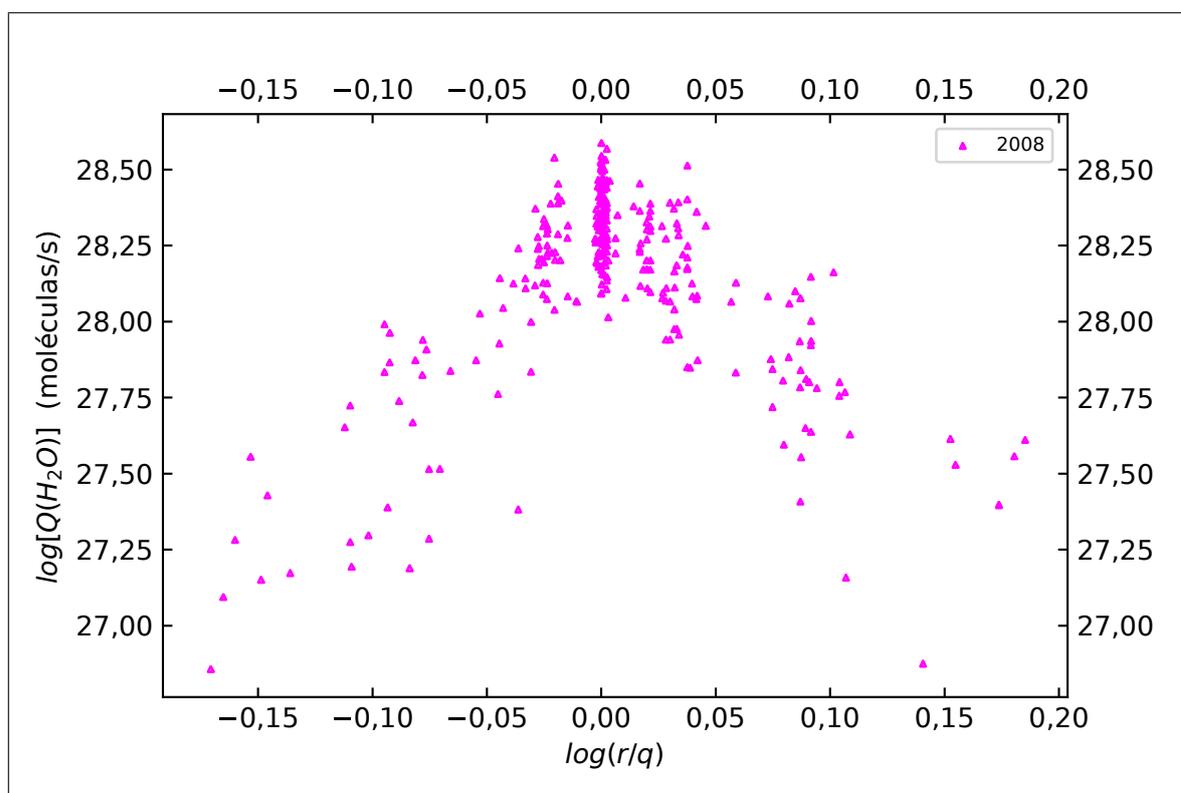


Figura A.9: O comportamento da taxa de produção de água para o cometa Wirtanen na passagem de 2008.

$$\text{Pré-Periélio : } \log[Q(H_2O)] = (28,34 \pm 0,02) - (7,50 \pm 0,39) \log(r_h/q) \quad (\text{A.7})$$

$$\text{Pós-Periélio : } \log[Q(H_2O)] = (28,35 \pm 0,014) - (5,64 \pm 0,284) \log(r_h/q) \quad (\text{A.8})$$

- 2018

A última passagem a ser analisada é de 2018. Vemos na figura A.10 uma boa definição das curvas para as fases pré e pós-periélicas, tendo um pico de atividade em 10 de dezembro, atingindo uma taxa de produção de água de  $1.6418 \times 10^{28}$  moléculas/s e correlações de 0,60 para as equação A.9 e A.10.

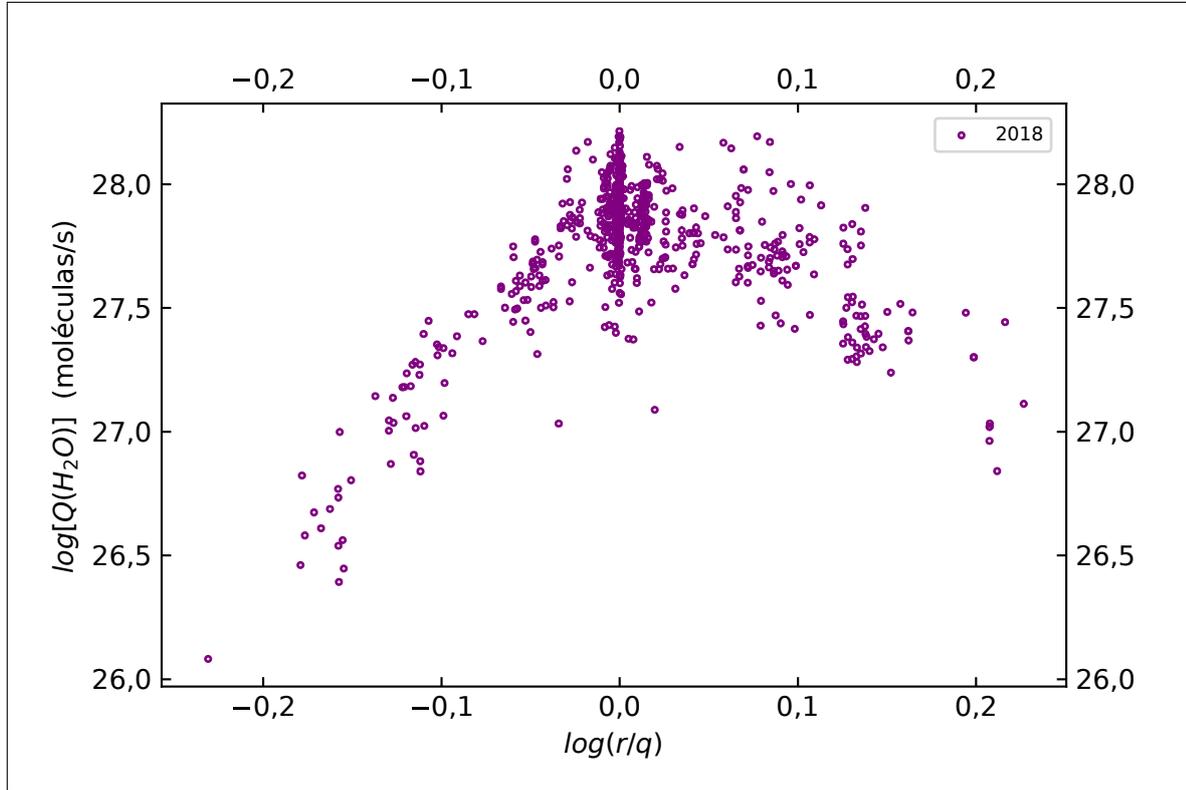


Figura A.10: O comportamento da taxa de produção de água para o cometa Wirtanen na passagem de 2018.

$$\text{Pré-Periélio : } \log[Q(H_2O)] = (27,91 \pm 0,009) - (7,02 \pm 0,181) \log(r_h/q) \quad (\text{A.9})$$

$$\text{Pós-Periélio : } \log[Q(H_2O)] = (27,92 \pm 0,011) - (2,99 \pm 0,161) \log(r_h/q) \quad (\text{A.10})$$

Um aumento suave da taxa de produção de água entre 82 e 76 dias antes do periélio, com  $\log(r/q) \approx -0.15$ , pode estar indicando um *outburst*. Além disso, há 28 dias do periélio e  $\log(r/q) \approx -0.03$ , a atividade cometária aumenta bruscamente, porém, por se tratar de dados de diferentes observadores, pode ter ocorrido pequenos erros na distribuição.

Farnham et al. (2019), a partir de observações realizadas durante 20 dias com o satélite TESS (*Transiting Exoplanet Survey Satellite*), indicaram a atividade de *outbursts* em 2018, no dia 26 de setembro, a -81 dias do periélio. Além disso, um levantamento bibliográfico cita a visualização destas atividades em 7 de outubro de 1991 (+16 dias do periélio), 25 de setembro de 2002 (+29 dias do periélio) e 16 de maio de 2008 (+86 dias do periélio). Quase todas essas detecções foram confirmadas em nossa análise, com exceção da passagem de 2018, onde vemos uma pequena atividade anteriormente a +81 dias. É notável que a posição orbital do objeto não é um fator definitivo para a formação destes *outbursts*.

Para esta análise, foi necessário verificar, em detalhes, os resultados das observações para a diferenciação de pontos de erro, causados por diferentes observadores e instrumentos, e verdadeiros *outbursts*.

### A.3 Determinação do raio nuclear

Como feito para o cometa Kohler no capítulo 3, utilizaremos a equação 3.14 para determinação da fração de área ativa do núcleo cometário e, por consequência, a área ativa do cometa de acordo com sua aproximação e afastamento do periélio, como indicado na figura A.11.

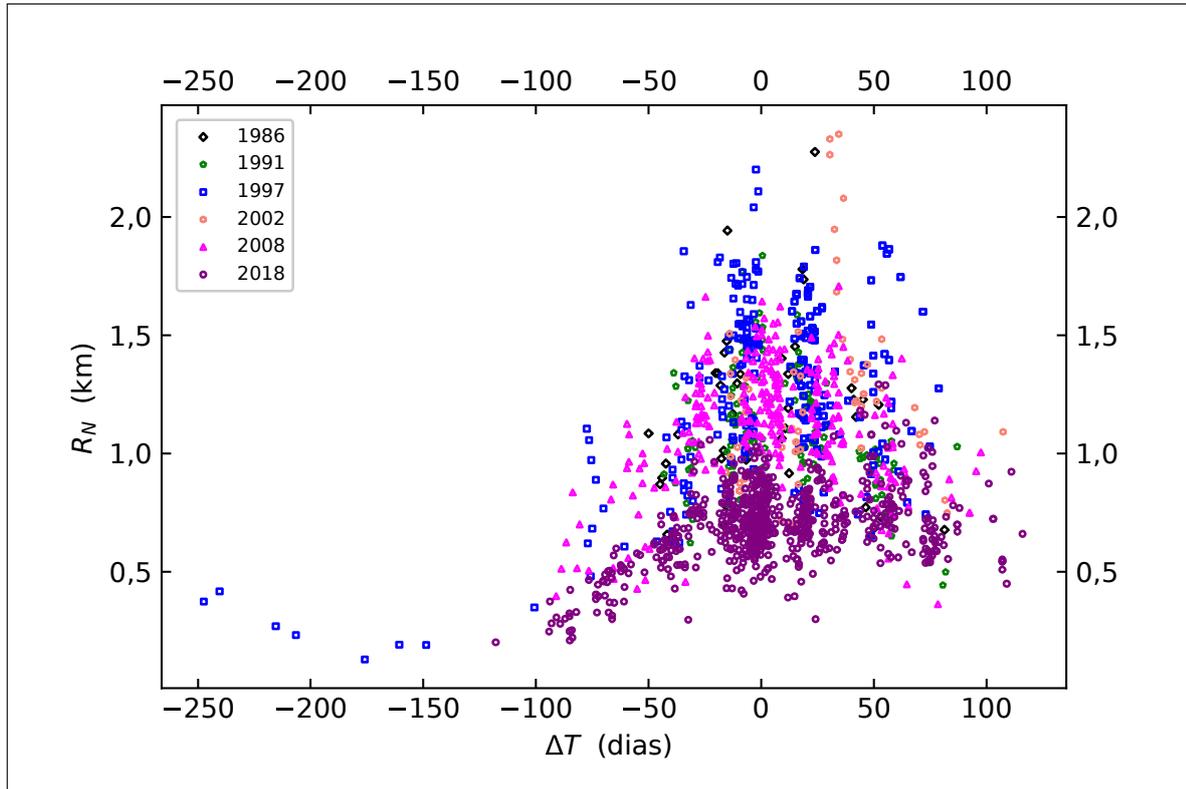


Figura A.11: Variação do raio nuclear do cometa Wirtanen para diferentes passagens.

Podemos observar alguns pontos de maiores áreas ativas, ao se aproximar do periélio, nos anos de 1992 e 2002. Eles se devem às condições de hiperatividade do cometa e, possivelmente, à alta volatilidade dos compostos dispostos nas partes mais externas do núcleo cometário durante tais passagens.

Utilizando a condição de simetria esférica e o regime de rotação rápida do núcleo, pudemos estimar os raios nucleares mínimo e efetivo do cometa.

A última passagem a ser analisada é de 2018. Vemos na figura A.10 uma boa definição das curvas para as fases pré e pós-periélicas, tendo um pico de atividade em 10 de dezembro, atingindo uma taxa de produção de água de  $1.6418 \times 10^{28}$  moléculas/s e correlações de 0,60 para as equações A.9 e A.10.

É notável, novamente, a perda de material do núcleo cometário a cada passagem. O valor extrapolado de  $R_N = 1,54 \text{ km}$ , em 2002, pode ser explicado por estarmos considerando as condições de hiperatividade. O menor raio nuclear estimado, de  $R_N = 0,88 \text{ km}$ , foi no ano de 2018, como esperado.

A observação do cometa Wirtanen, realizada em 17 de maio de 1999 no observatório VLT (*Very Large Telescope*), localizado no Chile, indicou um raio nuclear de 0,56 km, considerando um albedo geométrico de 0,04 (Boehnhardt et al., 2002). As diferenças apontadas em nossos resultados são satisfatórias se considerarmos os distintos métodos de observação e os possíveis erros causados pela variedade na base de dados tratada aqui, e pelo comportamento não isotrópico das taxas de produção cometárias.



### *Time-Resolved Model (TRM)*

A fotodissociação da água, exposta na seção 1.2, produzindo a molécula filha de  $H$ , resulta em uma grande e pouco densa coma de hidrogênio ao redor do cometa, podendo atingir um raio da ordem de  $10^7$  km. Assim, permite-se analisar as linhas  $Ly - \alpha$  nesta coma, sendo estas linhas espectrais do átomo de hidrogênio, emitidas após transições de elétrons do nível de energia  $n=2$  para o nível  $n=1$ , com  $n$  sendo o número quântico principal. Isto pode ser feito utilizando o método apresentado pelo *Time-Resolved Model*.

O *TRM* é descrito como sendo uma combinação entre simuladores 3D de partículas, fórmulas analíticas e manipulação de imagens elementares. Sendo considerado, então, um método semi-analítico. Ele estabelece relações mais realistas, levando em conta variações na extensão da coma, anisotropias e aproximações de assimetrias, utilizando o Modelo de Syndyname (Keller e Meier, 1976), o Modelo Vetorial (Festou, 1981) e simulações a partir do distribuições estatísticas para a trajetória de partículas, aplicando o modelo de Monte Carlo (Combi e Smyth, 1988a,b).

A contribuição não-analítica do modelo vem como forma de estabelecer resultados corrigidos de parâmetros que a parte analítica não consegue resolver por utilizar aproximações de simetrias esféricas para densidade de coluna (Modelo de Haser, apresentado na seção 2.1) e perfis de intensidade de  $Ly - \alpha$ . Também, considera-se padrões geométricos dependentes do observador e examina-se variações produzidas pelo movimento orbital do núcleo e pela iluminação, não uniforme, do Sol. São necessárias cerca de  $10^4$  partículas para a simulação, menos do que o requerido para a aplicação direta do modelo de Monte Carlo.

Considerando os *lifetimes*, os *g-factors* e as distribuições de velocidades das moléculas e dos átomos de  $H$  (variações das intensidades de espalhamento - Modelo Híbrido), unidas ao passo a passo das correções geométricas e analíticas, respeitando a distribuição não

uniforme de possíveis fontes de átomos de  $H$  nas taxas de produção, são realizadas deconvoluções temporais e espaciais como forma de estimar as curvas de produção de água, levando em conta médias diárias e minimizando o erro causado por possíveis flutuações na coma, como pequenos *outbursts*. Assim, os resultados se tornam mais próximos das condições reais em que se encontra a coma cometária.

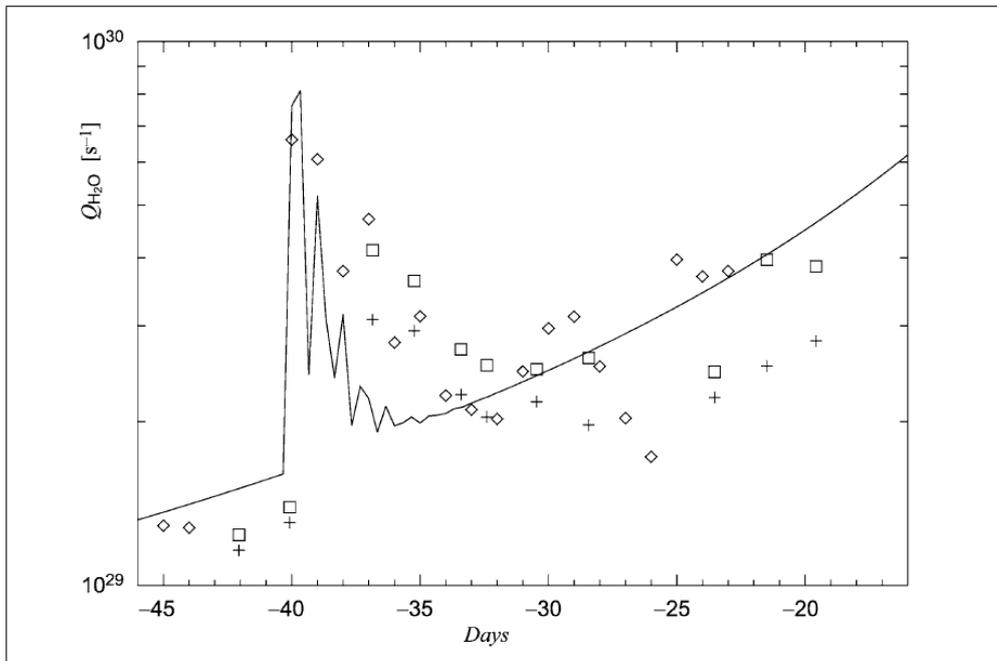


Figura B.1: Análise modelada para dados sintéticos do cometa C/1995 O1 (Hale–Bopp), indicando um *outburst* (linha sólida), e comparando os modelos de simetria esférica padrão, independente do tempo (linhas cruzadas), o TRM dependente (losangos) e independente do tempo (quadrados) (Mäkinen e Combi, 2005).

A figura B.1 indica a comparação de resultados entre o modelo de simetria esférica padrão, independente do tempo, e o TRM dependente e independente do tempo. Disto, pode-se observar que o modelo simétrico, por si só, não justifica os valores das altas taxas de produção para distância heliocêntricas pequenas, período, este, em que o livre caminho médio é encurtado e as taxas de colisão aumentam. Além disso, o TRM deconvoluido apresenta grande concordância com os resultados observacionais.

A descrição desse modelo pode ser vista com detalhes em Mäkinen e Combi (2005) e Combi et al. (2005).

## Cometas de longo período e dinamicamente novos - Uma comparação com o C/1977 R1 (Kohler)

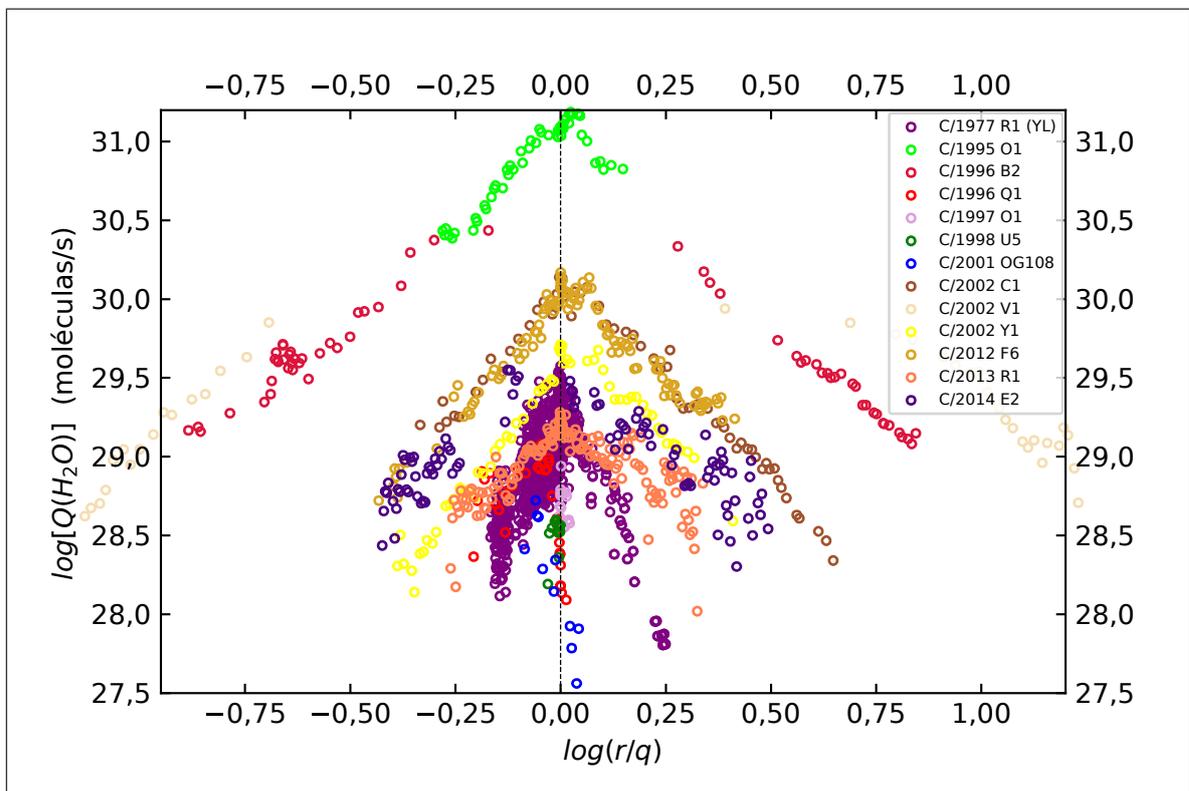


Figura C.1: A variação da taxa de produção de água com a distância heliocêntrica e a comparação entre cometas velhos e de longo período (OL) (Combi et al., 2019) e o C/1977 R1 (Kohler).

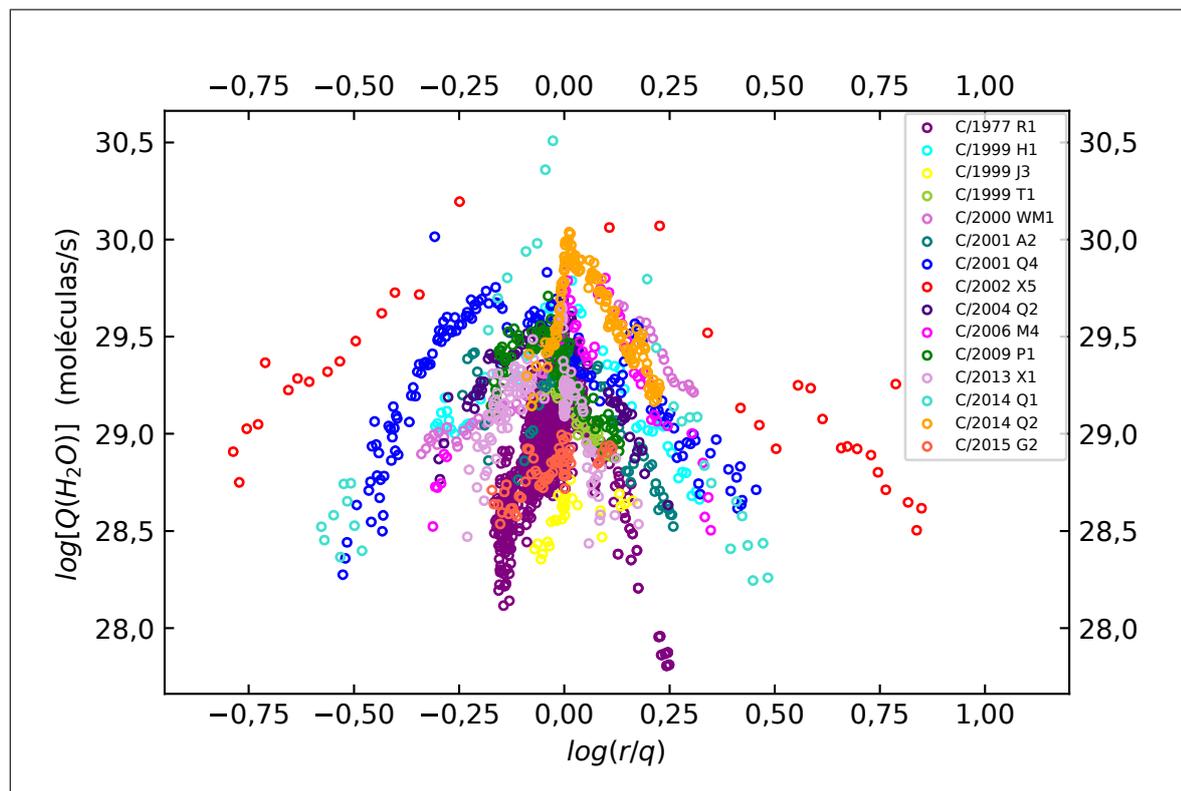


Figura C.2: A variação da taxa de produção de água com a distância heliocêntrica e a comparação entre cometas jovens e de longo período (YL) (Combi et al., 2019) e o C/1977 R1 (Kohler).

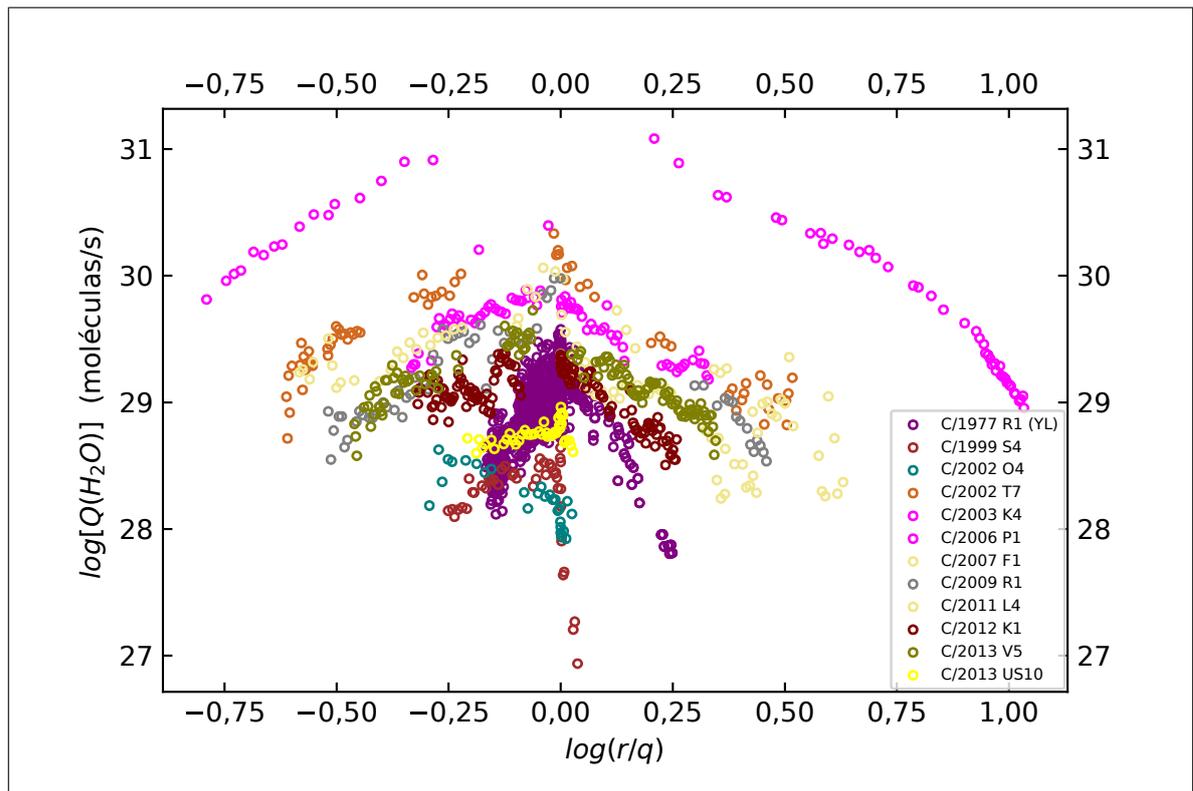


Figura C.3: A variação da taxa de produção de água com a distância heliocêntrica e a comparação entre cometas dinamicamente novos (DN) (Combi et al., 2019) e o C/1977 R1 (Kohler).

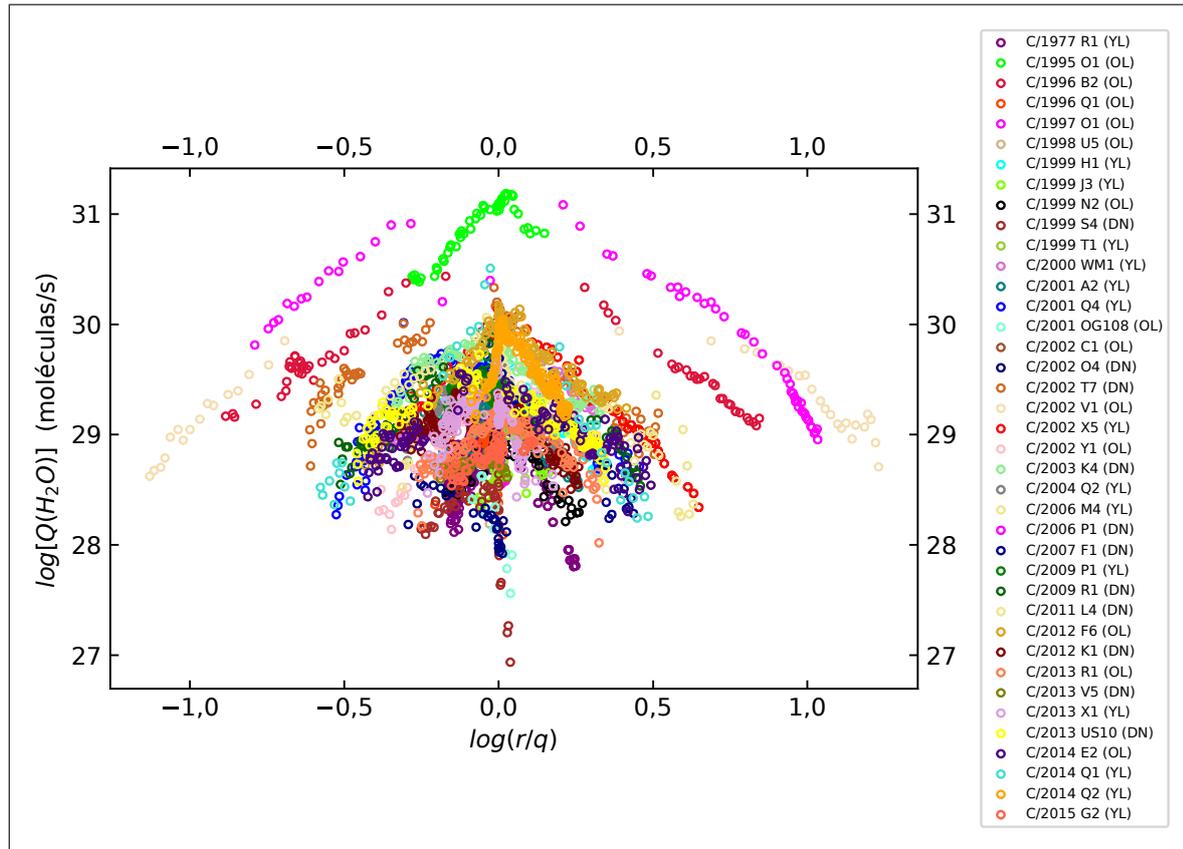


Figura C.4: A variação da taxa de produção de água com a distância heliocêntrica e a comparação entre cometas analisados por (Combi et al., 2019) e o C/1977 R1 (Kohler).

As figuras C.1, C.2, C.3 e C.4 mostram como se incluiria o cometa Kohler em cada classificação dinâmica, tendo as distâncias heliocêntricas normalizadas pelas distâncias periélicas respectivas de cada objeto.

É visível que, para o caso de cometas *DN*, o cometa Kohler (em roxo) não se encaixa devido a sua *slope* acentuada e íngreme. Nesta classe, os objetos tendem a ter uma taxa de produção de água com pouca variação em relação ao seu deslocamento em direção ao centro de gravidade do Sol, tendendo a permanecer aproximadamente constante entre as fases pré e pós periélicas, com excessões significativas dentre cometas que sofreram desintegração de seu núcleo com a aproximação da radiação solar devido à sua alta porosidade (C/1999 S4, por exemplo), fator justificado, possivelmente, por sua origem em regiões mais quentes da nebulosa primitiva do Sistema Solar (Mäkinen et al., 2001).

Cometas *YL* e *OL* tendem a apresentar distribuições menos planas em sua atividade, possuindo variações maiores nas taxas de produção de água. Os mais velhos apontam uma sublimação de seu material mais rapidamente com a diminuição da distância heliocêntrica.

Analisando os picos e o comportamento das curvas, percebemos que o cometa Kohler concorda com cometas de sua classificação original, os jovens e de longo período (YL) C/2001 A2 e C/2015 G2. Apesar disso, sua defasagem com cometas mais velhos (OL) é, relativamente, pequena, tendo comportamento na fase pré-periódica similar ao do cometa C/1996 Q1 (em vermelho), posteriormente fracionado.

Em relação ao picos das taxas de produção, a figura C.4 aponta uma independência com as classes dinâmicas, tendo os cometas C/2006 P1 (DN) e C/1995 O1 (OL) com valores máximos, atingindo taxas da ordem de  $10^{31}$  moléculas/s.