



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**INPE-9843-TDI/866**

**ESTUDO DE METEOROS E INVESTIGAÇÕES DE SEUS EFEITOS  
NA IONOSFERA COM DADOS DO RADAR SKiYMET E GPS**

Jorge Albuquerque de Souza Corrêa

Dissertação de Mestrado em Astrofísica, orientada pelos Drs. José Williams dos Santos Vilas Boas e Barclay Robert Clemesha, aprovada em 27 de fevereiro de 2003.

523.6

CORRÊA, J. A. S.

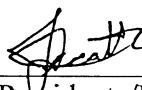
Estudo de meteoros e investigações de seus efeitos na ionosfera com dados do radar SKiYMET e GPS / J. A. S. Corrêa. – São José dos Campos: INPE, 2003.

149p. – (INPE-9843-TDI/866).

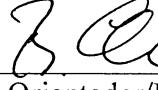
1.Cometas. 2.Asteróides. 3.Meteoróides. 4.Meteoros. 5.Chuvas de meteoróides. 6.Meteoróides esporádicos. 7.Radar. 8.Sistema de navegação por satélites. 9.Densidade eletrônica ionosférica. I.Título.

Aprovado pela Banca Examinadora em  
cumprimento a requisito exigido para a  
obtenção do Título de **Mestre** em  
**Astrofísica.**

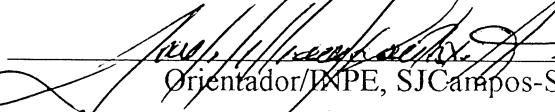
Dr. José Roberto Cecatto

  
Presidente/INPE, SJCampos-SP

Dr. Barclay Robert Clemesha

  
Orientador/INPE, SJCampos-SP

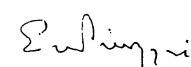
Dr. José Williams dos Santos Vilas Boas

  
Orientador/INPE, SJCampos-SP

Dr. Paulo Prado Batista

  
Membro da Banca/INPE, SJCampos-SP

Dr. Enos Picazzio

  
Membro da Banca  
Convidado IAG/USP, São Paulo-SP

Candidato: Jorge Albuquerque de Souza Corrêa

São José dos Campos, 27 de fevereiro de 2003.



**“May not our periodic meteors be debris of ancient but now disintegrated comets,  
whose matter has become distributed round their orbits?”**

**Kirkwood, 1861.**



**Dedico este trabalho à “senhora vida”  
pela oportunidade de um recomeço...**



## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à minha família por tudo que fizeram e fazem por mim, permitindo que eu chegassem até aqui, o INPE! Com o apoio de vocês posso ir muito além, sempre! Acredito que minha gratidão por vocês será eterna...

Ao Dr. José Williams dos Santos Vilas boas, agradeço pela compreensão e confiança depositadas em mim. Saiba que o tema sugerido para este trabalho de mestrado despertou-me muita curiosidade e vontade de aprender algo novo. Desculpe-me se em alguns momentos não correspondi às expectativas. Este período de convívio trouxe para mim bastante amadurecimento como ser humano e futuro cientista.

Ao Dr. Barclay Robert Clemesha, agradeço por sua cooperação neste trabalho. Graças aos seus esforços, pude realizar a análise de dados do radar meteóricos SKiYMET, sem os quais esta dissertação não existiria. Obrigado pelo bom relacionamento que tivemos desde que assumiu, concomitantemente com o Dr. José Williams, a orientação deste trabalho.

Aos professores Dr. João Braga, Dr. Joaquim Costa, Dra. Cláudia Vilega Rodrigues, Dr. Odylio Denys de Aguiar e Dra. Maria Virgínia Alves, agradeço pela oportunidade de aprender com vocês. Gostaria de registrar minha admiração pelos excelentes profissionais que são tanto no campo do ensino quanto da pesquisa. Obrigado pela boa convivência durante os cursos ministrados, pois sem isto talvez meu desempenho acadêmico não tivesse sido bom. Meus sinceros agradecimentos.

Ao Dr. Jayr de Amorim Filho, agradeço pelo incentivo dado a mim durante o estágio docência que realizei no ITA (Instituto Tecnológico de Aeronáutica). Acredito que nada nesta vida está ao acaso, mas foi o “acaso” que deu a oportunidade de nos conhecermos, o que para mim foi de grande valia. Aprendi bastante com aqueles nossos “bate-papos” informais. Muitíssimo obrigado.

Agradeço ao Dr. Paulo Prado Batista pela colaboração com este trabalho e pelas interessantes discussões sobre fatos relacionados com as chuvas de meteoros, mesmo não sendo sua área de pesquisa. Acredito que seja um grande admirador deste fenômeno tanto quanto eu passei a ser.

À Dra. Vinod Krishan, agradeço por suas sábias palavras durante as conversas que tivemos. Após conhecê-la melhor, percebi que além de excelente cientista, estava eu convivendo com uma mulher de vanguarda! Sorte daqueles que souberam aproveitar sua estadia no Brasil, país que tanto gosta. Obrigado por tudo.

Agradeço à “minha pequena”, Márcia, pelo companheirismo nos bons e maus momentos desta etapa de minha vida. Seu carinho e seu zelo por mim foram fundamentais... Saiba que te quero bem!

Ao meu mui amigo Kenny, boliviano da região andina, agradeço pelo laço de amizade que formamos nestes quase dois anos de convivência. Obrigado pelos conselhos e auxílios dados quando precisei. Valeu companheiro!

Agradeço a acolhida que tive na Divisão de Astrofísica e o bom convívio que mantive com a maioria dos colegas de curso e funcionários que conheci. Agradeço à CAPES pelo fomento de minha bolsa de mestrado vinculada ao curso de astrofísica do INPE no período de setembro de 2001 a outubro de 2002.

Por fim, agradeço à vida que me abriu as portas para um novo mundo. Ter realizado uma pós-graduação no INPE foi maravilhoso. O INPE é um local mágico, agradabilíssimo. Tudo parece estar no seu devido lugar. Espero que permaneça assim ou até melhor. Ter em nosso país um instituto desse porte é fantástico. Tive a oportunidade de trocar idéias com pessoas de diversos países. Pude conhecer vários jovens de outras áreas de pesquisa procedentes de diferentes lugares desse nosso imenso Brasil... De fato, foi uma experiência única e uma grande honra fazer parte da história do *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*, o nosso INPE.

## RESUMO

Utilizamos os dados do radar científico SKiYMET (*VHF All-Sky Interferometric Meteor Radar*) e as medidas do Conteúdo Eletrônico Total (CET) da ionosfera derivadas a partir de dados da rede de satélites do Sistema Global de Posicionamento (GPS), a fim de estudar atividades meteóricas. A partir de dados obtidos nos anos de 1999-2001, analisamos as propriedades dos meteoros esporádicos e de três chuvas de meteoros (Delta Aquaridas do Sul, Leonidas e Geminidas). Dentre tais propriedades destacam-se as distribuições das taxas de ocorrência de meteoros por altura e por hora, as distribuições de velocidades geocêntricas e as distribuições do tempo de duração dos meteoros, assim como a posição dos radiantes e os dias de máxima atividade das chuvas de meteoros. A partir dos resultados de nossa análise apresentamos as principais características de cada uma das chuvas de meteoros, bem como dos meteoros esporádicos, a fim de discutirmos suas diferenças. Por fim, durante o período dessas chuvas de meteoros para os anos de 1999 e 2000, investigamos se as mesmas têm qualquer impacto significativo na alta atmosfera que se relate com flutuações de densidade eletrônica na ionosfera.



# **STUDY OF THE METEORS AND INVESTIGATIONS OF THEIR EFFECTS IN THE IONOSPHERE FROM DATA OF SKYMET RADAR AND GPS**

## **ABSTRACT**

We use the data obtained from the SKYiMET (*VHF All-Sky Interferometric Meteor Radar*) scientific radar and the measurements of the Total Electron Content (TEC) in the ionosphere derived from the *Global Positioning System* (GPS) satellite network, to study meteoric activity. From the meteor data obtained during the years 1999-2001, properties of sporadic meteors and three meteor showers (Southern Delta Aquarids, Leonids and Geminids) are analysed. Such properties are the influx distributions as a function of altitude and time, the geocentric velocity distributions and the life-time distributions, as well as the radiant positions and maximum activity days of the meteor showers. We present the main characteristics of each meteor shower as well as sporadic meteors to discuss their differences. Finally, during the period of these meteor showers for 1999 and 2000, we investigate whether these have any significant impact on the upper atmosphere related to electronic density fluctuations in the ionosphere.



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>CAPÍTULO 2 – METEOROS .....</b>	<b>21</b>
2.1. Meteoróides: a origem dos meteoros .....	22
2.2. Evolução de um Meteoro na Atmosfera .....	24
2.3. Classificação de Meteoro .....	26
2.3.1. Chuvas de Meteoros .....	26
2.3.2. Meteoros Esporádicos .....	28
2.4. Elementos Orbitais e Velocidades de Meteoros .....	29
2.5. Efeitos Diurno e Sazonal de Meteoros .....	33
2.6. Efeitos Causados por Meteoros na Alta Atmosfera Terrestre .....	34
<b>CAPÍTULO 3 – TÉCNICAS OBSERVACIONAIS .....</b>	<b>37</b>
3.1. Observação Visual .....	37
3.2. Fotografia .....	38
3.3. Televisão .....	38
3.4. Espectroscopia .....	39
3.5. Radar .....	39
3.6. Meteoros Artificiais .....	40
<b>CAPÍTULO 4 – TÉCNICA DE RADAR .....</b>	<b>43</b>
4.1. Equação do Radar .....	45
4.2. Alcance Máximo .....	47
4.3. Sensibilidade Mínima, Ruídos de Receptores, Ruídos Cósmicos .....	48
4.3.1. Efeitos de Propagação .....	50
4.4. Trilhas de Meteoros e Duração de Ecos .....	51
4.5. Método para Determinação de Velocidades Geocéntricas .....	54

<b>CAPÍTULO 5 – OBSERVAÇÕES E ANÁLISES .....</b>	<b>57</b>
5.1. Radar SKiYMET .....	57
5.1.1. Critérios de Seleção de Meteoros .....	59
5.2. Análise das Chuvas de Meteoros .....	62
5.2.1. Determinação dos Radiantes .....	62
5.2.2. Método de Separação de Meteoros .....	65
5.2.3. Distribuição de Meteoros por Altura .....	68
5.2.4. Distribuição Diurna de Meteoros .....	69
5.2.5. Distribuição de Velocidades Geocêntricas .....	71
5.2.6. Distribuição do Tempo de Duração de Meteoros .....	71
5.3. Análise de Meteoros Esporádicos .....	72
5.3.1. Distribuição de Esporádicos por Altura e por Hora .....	72
5.3.2. Variação Sazonal de Meteoros Esporádicos .....	72
5.3.3. Distribuição de Velocidades Geocêntricas .....	73
5.3.4. Distribuição do Tempo de Duração de Esporádicos .....	73
5.4. Rede GPS .....	73
5.5. Análise de Efeitos no Conteúdo Eletrônico Total (CET) da Ionosfera .....	77
<b>CAPÍTULO 6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>79</b>
6.1. Seleção das Chuvas de Meteoros .....	79
6.2. Resultados para as Chuvas de Meteoros .....	80
6.2.1. Distribuição de Meteoros por Altura .....	80
6.2.2. Distribuição Diurna de Meteoros .....	86
6.2.3. Distribuição de Velocidades Geocêntricas .....	90
6.2.4. Distribuição do Tempo de Duração de Meteoros .....	94
6.3. Resultados para Meteoros Esporádicos .....	95
6.3.1. Distribuição de Esporádicos por Altura .....	95
6.3.2. Distribuição Diurna de Esporádicos .....	98
6.3.3. Variação Sazonal de Meteoros Esporádicos .....	100
6.3.4. Distribuição de Velocidades Geocêntricas .....	103
6.3.5. Distribuição do Tempo de Duração de Esporádicos .....	104

6.4. Efeitos no Conteúdo Eletrônico Total (CET) da Ionosfera .....	105
6.5. Discussões Finais .....	110
6.5.1 Delta Aquaridas do Sul (DAS) .....	110
6.5.2. Leonidas (LEO) .....	111
6.5.3. Geminidas (GEM) .....	112
6.5.4. Meteoros Esporádicos .....	114
6.5.5. Comparação de Resultados .....	114
 <b>CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES</b> .....	 <b>119</b>
 <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	 <b>121</b>
 <b>APÊNDICE 1 – COMETAS</b> .....	 <b>129</b>
 <b>APÊNDICE 2 – ATMOSFERA TERRESTRE</b> .....	 <b>133</b>
 <b>APÊNDICE 3 – ASTERÓIDES</b> .....	 <b>137</b>
 <b>APÊNDICE 4 – ATRAÇÃO GRAVITACIONAL</b> .....	 <b>139</b>
 <b>APÊNDICE 5 – MECANISMOS DE ABLAÇÃO</b> .....	 <b>141</b>



## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Os cometas (do grego, **cabeças com cabeleira**) são corpos celestes que carregam informações a respeito da origem do sistema solar. A observação destes objetos ocorre desde a antiguidade (cerca de 11 séculos a.C., datado pelos chineses), procurando-se conhecer a constituição, forma e movimento destes “mensageiros celestes”.

Acredita-se que os cometas se originaram em uma região de baixa temperatura ( $\sim 100\text{K}$  ou até mais fria) e que o material dos núcleos cometários está, portanto, no estado sólido. Este material, em grande parte volátil (gelo d’água, gelo de HCN e gelo de CH<sub>3</sub>CN; radicais livres de H, C, N e O), compõe a superfície dos cometas. Elementos mais pesados como Na, Ca, e Fe, por exemplo, formam a região mais interna do núcleo por terem, possivelmente, condensado-se primeiro que o material volátil (Whipple, 1978).

Em 1950, com base em dados observacionais, Oort propôs que a maioria destes núcleos condensados estariam confinados em uma região situada a cerca de 50.000 unidades astronômicas <sup>1</sup> (UA) do Sol. Este local é conhecido como **Nuvem de Oort**, contendo aproximadamente 100 bilhões de núcleos cometários que estão distribuídos de forma uniforme ao redor do Sol. Observações recentes (Vilas Boas et al., 2000) revelam que as condensações de nuvens escuras que formam estrelas de baixa massa (tal como o Sol, por exemplo) têm dimensões típicas de 0,25 parsec <sup>2</sup> (equivalente a 50.000 UA, o que está de acordo com a proposta feita por Oort). Este fato corrobora a hipótese dos cometas serem formados pelo material da nuvem primordial que deu origem ao sistema solar.

---

<sup>1</sup> A distância média Terra-Sol é 1 UA. Esta unidade é utilizada apenas para objetos do sistema solar. Seu valor é aproximadamente de 150 milhões de quilômetros.

<sup>2</sup> A unidade usual para objetos estelares e galácticos é o PARSEC – *PArallax per SECond*. Seu valor é aproximadamente de 30 trilhões de quilômetros.

Embora ainda não seja possível analisar os cometas diretamente, é possível fazê-lo de forma indireta através dos grãos de partícula sólida que permeiam o meio interplanetário, cuja origem, em sua maioria, é atribuída aos cometas (ver Apêndice 1). Alguns destes grãos, que segundo a IAU (*International Astronomical Union*) são denominados **meteoróides** (ver Seção 2.1), possuem tamanho suficiente para gerar trilhas luminosas quando interagem com a atmosfera terrestre. Tal fenômeno é conhecido como **meteoro** (ver Capítulo 2).

Este conjunto de partículas é uma importante fonte de informação a respeito do comportamento da atmosfera terrestre (ver Apêndice 2), bem como tem uma importância apreciável na área aeroespacial, tornando-se necessário um melhor conhecimento da distribuição dos meteoróides na região interplanetária (como por exemplo, os feixes de meteoróides que dão origem as chuvas de meteoros), a fim de evitar danos em veículos espaciais. Portanto, dentro do conceito de **clima espacial**, que está relacionado com todo e qualquer fenômeno que interfira no ambiente terrestre, o estudo de meteoros, mais do que nunca, merece atenção especial.

Neste trabalho, utilizamos a técnica de radar mono-estático (ver Capítulo 4) a fim de estudar as propriedades de algumas **chuvas de meteoros** e **meteoros esporádicos** (ver Seção 2.3) no período de 1999 a 2001. Com esses dados, exploramos vários aspectos de três chuvas de meteoros (Delta Aquaridas do Sul, Leonidas e Geminidas), tais como a posição de seus radiantes e as respectivas taxas de ocorrência de meteoros tanto em função do tempo quanto da altitude. Analisamos ainda para cada uma destas chuvas a distribuição do tempo de duração das trilhas meteóricas e a distribuição de velocidades geocêntricas de seus meteoros.

Nos períodos analisados, realizamos ainda estimativas inferiores do número de meteoróides que entram por hora na Terra sob forma de meteoros esporádicos e avaliamos seu comportamento sazonal, bem como suas distribuições de velocidades geocêntricas. As propriedades dos meteoros esporádicos e das chuvas de meteoros são comparadas tendo como objetivo identificar características distintas entre esses tipos de meteoros.

Por fim, a partir de medidas do Conteúdo Eletrônico Total (CET) da ionosfera – que foram calculadas com dados obtidos da rede de satélites do Sistema Global de Posicionamento (GPS), em 1999 e 2000 – investigamos flutuações em CET que coincidem com o período das chuvas de meteoros analisadas.

No Capítulo 2, descrevemos o processo de formação de meteoros. No Capítulo 3, apresentamos as principais técnicas utilizadas em observações de meteoros. No Capítulo 4, exploramos os aspectos mais importantes de um radar. No Capítulo 5, apresentamos informações técnicas sobre a instrumentação utilizada para a aquisição dos dados analisados, bem como explicamos os procedimentos empregados na análise. No Capítulo 6, apresentamos e discutimos os resultados da análise tanto das chuvas de meteoros quanto dos meteoros esporádicos. Finalmente, o Capítulo 7 apresenta as conclusões desta dissertação.



## CAPÍTULO 2

### METEOROS

A palavra meteoros (*μετεωρα*, em grego) era bastante genérica, sendo empregada para se referir a quaisquer fenômenos associados à atmosfera terrestre, tais como auroras, formação de nuvens, precipitação de água, arco-íris, etc; os quais hoje são estudados pela meteorologia.

Atualmente este termo é bem específico, sendo usado apenas para fenômenos que se caracterizam por riscos rápidos e brilhantes no céu, as ditas **estrelas cadentes**. Os meteoros se formam quando partículas sólidas provenientes do meio interplanetário (meteoroídes ou detritos espaciais) penetram na atmosfera da Terra, sendo “vaporizadas”.

A maior parte da radiação emitida por um meteoro provém da região próxima à cabeça do meteoro, que corresponde a um ponto brilhante em movimento. Dependendo da energia cinética da partícula, pode-se formar atrás da cabeça do meteoro um rastro, comumente denominado **trilha do meteoro** (ver Seção 4.4), que pode durar frações de segundos ou até dias (McKinley, 1961). A trilha de um meteoro pode ser detectada visualmente ou por qualquer tipo de técnica instrumental adequada (ver Capítulo 3).

O **radiante** de um meteoro é o ponto da esfera celeste do qual surge o meteoro. Este efeito é mais fácil de ser notado quando observamos uma **chuva de meteoros** (ver Seção 2.3), pois vários meteoros parecem vir de uma única região do céu.

## 2.1. Meteoróides: a origem dos meteoros

Parte da população de meteoróides, como mencionado anteriormente, origina-se dos cometas e outra parte, em menor proporção, é atribuída à fragmentação de asteróides, que são corpos sólidos do meio interplanetário com extensões maiores que algumas dezenas de metros e menores do que 1000 km (ver Apêndice 3).

As velocidades de entrada dos meteoróides estão entre 11,2 km/s e 72,8 km/s (Ceplecha et al., 1998). O limite inferior de velocidade é devido à atração gravitacional terrestre sofrida pelos meteoróides, enquanto que o limite superior é devido à composição da velocidade parabólica típica de meteoróides situados aproximadamente à 1UA do Sol (42,5 km/s, limiar de escape do sistema solar) com a velocidade orbital da Terra (30,3 km/s). A formação de meteoros depende essencialmente da densidade, velocidade geocêntrica, ângulo de incidência na atmosfera, seção de choque e composição química dos meteoróides. Devido à interação de um meteoróide com a atmosfera, inicia-se o **processo de ablação** que causa a perda de massa do meteoróide por colisões com partículas da atmosfera. Os subprodutos da ablação podem ser fragmentos sólidos ou gás quente contendo átomos excitados e ionizados. Dessa forma, os meteoros são trilhas de **plasma**<sup>1</sup> geradas na atmosfera.

A massa dos meteoróides capazes de formar meteoros deve ser maior ou igual  $10^{-6}$  g (Hughes, 1978). Os meteoros ocorrem em regiões da alta atmosfera terrestre, entre 75 e 120 km de altitude, dentro da qual a grande maioria dos meteoróides é “vaporizada” (Müller, 1972).

---

<sup>1</sup> Plasma é o quarto estado da matéria. Este meio se caracteriza pela interação entre elétrons livres e átomos ou moléculas ionizadas, que têm um comportamento coletivo governado por forças coulombianas. Nem todo meio composto por partículas carregadas é um plasma. É necessário que a interação entre tais partículas obedeça a certos critérios, que aqui não serão abordados.

Os meteoros mais freqüentes em nossa atmosfera são formados a partir de meteoróides cujas dimensões estão entre 0,05 mm e 20 cm (Ceplecha et al., 1998). Estas partículas começam a sublimar <sup>1</sup> quando suas temperaturas superficiais atingem um valor de 2200 K, o que ocorre em torno de 80 e 90 km de altitude (Ceplecha et al. et al., 1998). Durante a formação de um meteoro, a temperatura do meio atinge cerca de 3000 K a 5000 K (Ceplecha et al., 1998), permitindo que átomos sejam excitados ou ionizados. Em geral, o processo de ablação para estes meteoróides é eficiente o bastante para que toda a massa do meteoróide seja consumida, ou seja, o fim da trilha meteórica coincide com a queima total da partícula neste caso.

Apenas uma pequena fração dos meteoróides consegue atingir o solo terrestre, porque poucos meteoróides com dimensões maiores que 20 cm interceptam a Terra (Ceplecha et al., 1998). Por este motivo, raramente se observa meteoros brilhantes. Tais meteoros são conhecidos como **bolas de fogo** ou **bólidos** (magnitude –8 ou menor). Nesta situação, a ablação do meteoróide termina antes que toda sua massa seja exaurida, restando ainda um núcleo com massa maior ou igual a 10g, que atinge a Terra como um **meteoro**.

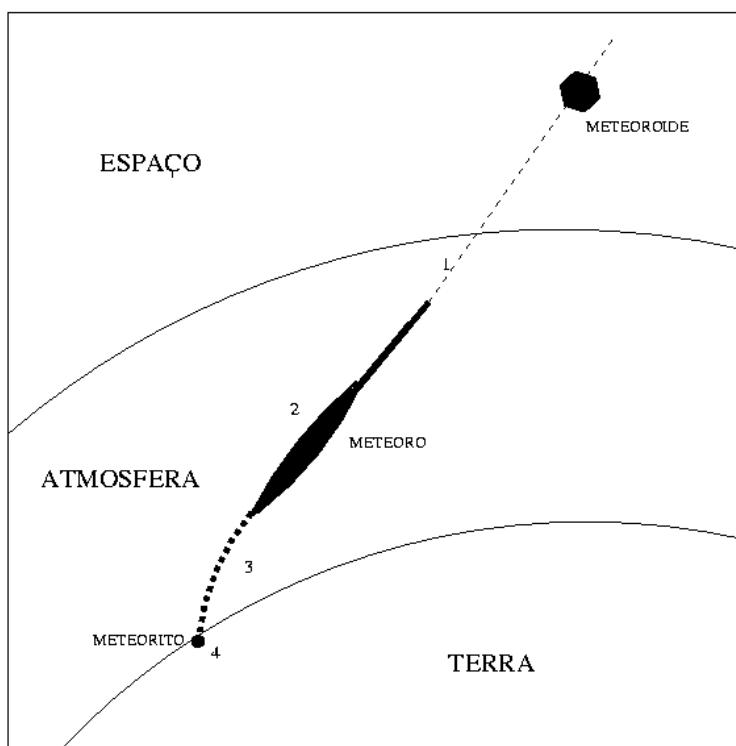
Partículas com massas inferiores a  $10^{-7}$ g passam pela atmosfera praticamente sem sofrer ablação, não produzindo trilhas de meteoro (Whipple, 1950a e 1951a). Neste caso, a partícula é denominada **micrometeoróide**. A energia cinética destas partículas quando convertida em calor (energia térmica) é completamente irradiada e o micrometeoróide não se vaporiza (McKinley, 1961). Isto ocorre porque a taxa de energia irradiada por estas partículas é proporcional a sua área enquanto a energia térmica absorvida ao seu volume (Hughes, 1978). Dessa forma, estas partículas caem na superfície da Terra como **micrometeoritos**.

---

<sup>1</sup> Sublimação é passagem do estado sólido para o gasoso.

## 2.2. Evolução de um Meteorito na Atmosfera

A interação de meteoróides com a atmosfera terrestre pode ser separada em quatro etapas distintas (Figura 2.1): pré-aquecimento, ablação, obscurecimento e impacto. A seguir fazemos uma descrição sucinta de cada um desses regimes, com base nas informações publicadas por Ceplecha et al. (1998):



**Fig. 2.1. Ilustração dos estágios de interação de um meteoróide com a atmosfera:**  
**(1) Pré-aquecimento; (2) Início e fim da ablação: formação do meteoro; (3) Vôo obscuro do núcleo de meteoróide que restou da ablação e (4) Impacto do meteoróide com a superfície terrestre: meteorito.**

1<sup>a</sup>. etapa – o pré-aquecimento de um meteoróide é devido às colisões que sofre com moléculas da atmosfera quando se desloca entre 300 km e 100 km de altitude. Nesse estágio, a temperatura superficial do meteoróide cresce exponencialmente com o tempo. Contudo, o interior destas partículas permanece com temperatura praticamente inalterada.

da, com exceção de pequenos grãos. O estágio de pré-aquecimento é curto e a máxima temperatura atingida, neste caso, é da ordem de 900 K.

2<sup>a</sup>. etapa – ocorre o processo de ablação, que se caracteriza inicialmente pela erosão da superfície do meteoróide a baixas temperaturas, gerando pequenos fragmentos. O estágio final da ablação corresponde à evaporação tanto do meteoróide quanto dos seus fragmentos ao atingirem temperaturas maiores ou iguais a 2200 K. A ablação é um processo importante, sendo uma consequência da transferência de energia cinética do meteoróide para o meio. Esta perda de energia implica na desaceleração do meteoróide. Quando, por exemplo, uma partícula desacelera até atingir a velocidades de 3 km/s em uma região da atmosfera bem acima da superfície terrestre e com uma massa ainda significativa (10g-10 kg), continua caindo em direção ao solo mas sem emitir radiação. Esta fase corresponde a um vôo obscuro do meteoróide, pois não há gás quente o suficiente em torno desta partícula para formar uma trilha excitada e ionizada. De fato, o mecanismo de ablação implica em considerações mais detalhadas, que são apresentadas no Apêndice 5.

3<sup>a</sup>. etapa – nesta fase não há energia cinética suficiente para evaporar ou aquecer o meteoróide. Dessa forma, inicia-se um processo inverso ao do pré-aquecimento, ou seja, um resfriamento rápido do meteoróide (temperatura cai exponencialmente com o tempo). Uma fina crosta é então criada em volta do material restante do meteoróide devido à baixa temperatura. Nesse estágio, a partícula sofre grande desaceleração e sua velocidade diminui para centenas de m/s. Além disso, a partícula assume um movimento de queda livre vertical, em que sua velocidade passa a variar com a raiz quadrada da densidade do ar. Neste caso, se a densidade do ar fosse constante, então a velocidade do meteoróide também se manteria constante.

4<sup>a</sup>. etapa – as velocidades de impacto de meteoritos na superfície terrestre variam, em geral, de 10 m/s a 100 m/s para massas terminais entre 10 g e 10 kg, respectivamente. O impacto destas partículas forma pequenos buracos no solo cujos tamanhos são maiores que a dimensão do próprio meteorito. Contudo, se acontecer de um meteoróide sofrer

continuamente o processo de ablação até atingir a superfície terrestre, um impacto muito maior ocorre. Neste caso, formam-se imensas crateras causadas pela súbita explosão gerada em consequência da enorme quantidade de energia cinética que é transferida ao solo devido à abrupta desaceleração do meteoróide no momento do impacto.

### 2.3. Classificação de Meteoros

Definem-se duas classes de meteoros de acordo com a distribuição dos meteoróides no espaço interplanetário: **esporádicos** e **chuvas**. A seguir descrevemos as características de cada uma destas classes.

#### 2.3.1. Chuvas de Meteoros

Observações de eventos meteóricos realizadas a partir do final do século XVIII contribuíram bastante para o início dos estudos da ciência de meteoros. A chuva Leonidas no ano 1799, Liridas em 1803 e Leonidas em 1833, são um exemplo desse fato. Particularmente em 13 de novembro de 1833, Leonidas foi um grande espetáculo que alarmou muitos daqueles que a assistiram. Foi a primeira vez que se notou que os meteoros dessa chuva eram provenientes da constelação do Leão. Em 1861, Kirkwood sugeriu que as chuvas de meteoros estariam associadas aos cometas (Kirkwood, 1867). Esta hipótese foi constatada por Schiaparelli (1866) quando anunciou que o feixe de Perseidas possuía parâmetros orbitais muito parecidos com os do cometa 1862 III (ou cometa Swift-Tuttle).

As chuvas de meteoros ocorrem quando a Terra passa através de anéis (ou feixes) de meteoróides que podem ser produzidos pelo decaimento de cometas ao longo de suas órbitas, principalmente quando se encontram no periélio (Whipple, 1950b e 1951b), ou pela fragmentação decorrente de colisões sofridas por asteróides cuja maior eficiência ocorre no afélio (Williams, 1993) ou ainda devido à quebra de núcleos cometários (Steel et al., 1991). A composição entre a velocidade do objeto original e a velocidade das partículas derivadas, faz com que os feixes de meteoróides passem a ter órbitas seme-

lhantes a do corpo celeste que os originou, mas com pequenas diferenças em parâmetros orbitais.

A Terra diariamente encontra em seu trajeto diversos feixes de meteoróides (Ceplecha et al., 1998). Estes feixes, em sua maioria, têm órbitas pouco conhecidas e suas partículas podem ser confundidas com meteoróides esporádicos. Porém, há feixes bem definidos que estão associados com as chamadas “**grandes chuvas de meteoros**”. As características de uma chuva de meteoro estão intrinsecamente relacionadas com aquelas do feixe atravessado pela Terra.

Um feixe de meteoróides leva um certo tempo para ser formado. Para meteoróides ejetados de núcleos cometários, o tempo necessário para formar o feixe depende do tamanho dos meteoróides, do raio do núcleo do cometa, da distância do cometa ao periélio e do tamanho da órbita do cometa. Nestas circunstâncias, são três os estágios de evolução de um feixe (Hughes, 1978):

1º. estágio – o feixe de meteoróides ocupa apenas uma certa porção da órbita do cometa. Isto ocorre pelo fato do cometa ter passado poucas vezes pelo periélio. As chuvas de meteoros associadas a este estágio têm duração de poucas horas. Estas chuvas apresentam aumentos no influxo de partículas exatamente quando ocorre a passagem do cometa associado com o feixe que dá origem a chuva de meteoros (ex.: Leonidas e Giacobinidas);

2º. estágio – o feixe de meteoróides encontra-se completamente preenchido, porém com menor concentração de meteoróides no afélio do que no periélio. As chuvas, neste caso, são curtas e apresentam um radiante bem concentrado com taxas de ocorrência razoavelmente constantes (ex.: Quadrantidas e Liridas);

3º. estágio – a largura do feixe de meteoróides é apreciavelmente maior. Acredita-se que são feixes antigos que tiveram tempo suficiente para que colisões entre os meteoróides tenham ocorrido de maneira a provocar um grande alargamento do feixe. As chuvas,

nesta configuração, duram semanas ou até mais, apresentando um radiante bem difuso (ex.: Perseidas).

Durante o período das chuvas, diversos meteoros parecem surgir de um mesmo ponto da esfera celeste, que é definido como sendo o radiante da chuva. Todavia, isto é um efeito de perspectiva. As chuvas de meteoros são denominadas de acordo com a constelação na qual se encontram seus radiantes.

### 2.3.2. Meteoros Esporádicos

Os meteoróides que se desprendem dos feixes dão origem aos chamados **meteoros esporádicos**. O principal processo responsável por este desprendimento é a colisão entre as partículas dos feixes, sendo este processo mais eficiente no periélio devido à maior densidade de partículas nessa região. Perturbações gravitacionais causadas pela aproximação de planetas e a perturbação pela radiação solar (efeito *Poynting-Robertson*) também podem provocar a saída dos meteoróides dos feixes.

A maioria dos meteoros que ocorrem na Terra é devido aos meteoróides dissociados de qualquer feixe e, ao contrário do que pode sugerir tal nome, os meteoros esporádicos estão constantemente ocorrendo. Apenas  $\frac{1}{4}$  dos meteoros é devido a componente de chuvas de meteoros (Ceplecha et al., 1998). Os esporádicos formam uma espécie de ruído de fundo na atmosfera. Em certos casos, é muito difícil distingui-los dos meteoros de chuvas, principalmente quando a chuva está relacionada com pequenos feixes de meteoróides, que caracterizam as “**pequenas chuvas de meteoros**”.

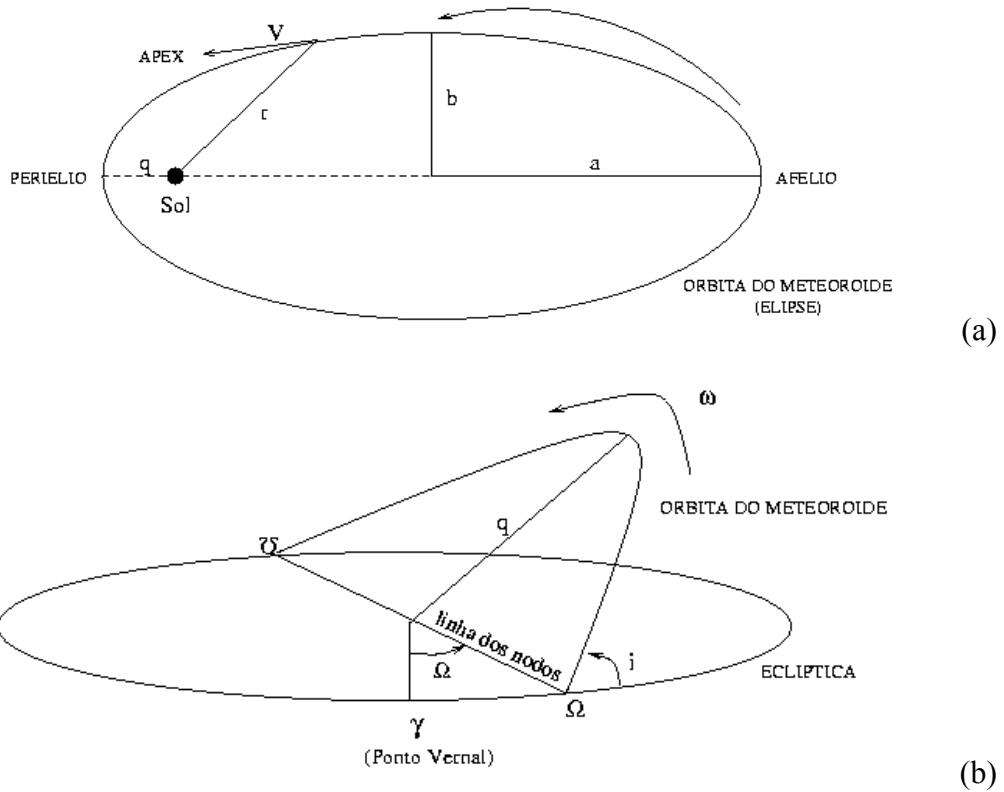
Em primeira aproximação, podemos considerar que os esporádicos se distribuem aleatoriamente na esfera celeste com órbitas randômicas e independentes dentro do sistema solar (Hughes, 1978). Os meteoros esporádicos também são produzidos por partículas provenientes do meio interestelar. Neste caso, estas partículas devem ter velocidades geocêntricas acima de 72 km/s, que são maiores do que aquelas dos meteoróides origi-

nários do próprio sistema solar (Taylor et al., 1994; Baggaley, 2000; Landgraf et al., 2000).

Anualmente, os meteoros esporádicos e as chuvas de meteoros depositam cerca de 16.000 toneladas de matéria do meio interplanetário na atmosfera terrestre, provenientes de meteoróides com baixa massa (Hughes, 1978). Observações mostram que a distribuição de ocorrências de meteoros esporádicos na esfera celeste não é homogênea, tendendo a se concentrar em duas grandes regiões da esfera celeste (Davies, 1957; Jones & Brown, 1994). Esse comportamento está relacionado com a distribuição de meteoróides dentro do sistema solar e não com os feixes responsáveis pelas chuvas de meteoros. Essa informação é extremamente importante, tanto para um melhor entendimento da dinâmica dos meteoróides em nosso sistema, quanto para definir órbitas seguras de veículos espaciais em viagens de longas distâncias.

#### **2.4. Elementos Orbitais e Velocidades de Meteoros**

Os principais parâmetros que definem a órbita elíptica de um meteoróide são: o semi-eixo maior da órbita ( $a$ ), a inclinação da órbita em relação à eclíptica ( $i$ ), a excentricidade da órbita ( $e$ ), os nodos ascendente ( $\cap$ ) e descendente ( $\cup$ ); distância ao periélio ( $q$ ) e o argumento do periélio ( $\omega$ ). Estes parâmetros estão ilustrados na Figura 2.2 (a) e (b).



**Fig. 2.2. (a) Geometria de uma órbita elíptica para um meteoróide com velocidade linear  $V$ , sendo  $r$  a distância do meteoróide ao Sol e  $b$  o semi-eixo menor da elipse; (b) Esquema representativo da órbita de um meteoróide com seus específicos parâmetros orbitais em relação à eclíptica.**

O tipo de órbita de qualquer objeto está intrinsecamente relacionado com sua velocidade e com sua distância ao foco da trajetória descrita. Dessa forma, a Terra que possui uma velocidade orbital em torno do Sol de aproximadamente 30 km/s, tem uma excentricidade aproximadamente nula ( $e = 0,0167227$ ), o que corresponde a uma órbita quase circular.

A lei de gravitação de Newton aplicada aos meteoros para uma órbita elíptica, pelo fato dos meteoróides apresentarem uma pequena massa comparada com a da Terra e considerando a conservação de energia do sistema meteoróide-Terra, gera a seguinte equação (ver Apêndice 4):

$$V^2 = GM \left( \frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right) \quad (2.1)$$

Sendo,

$V$  – velocidade do meteoróide em relação à Terra;

$r$  – distância do meteoro à Terra;

$a$  – semi-eixo maior da órbita do meteoro;

$M$  – massa da Terra;

$G$  – constante de gravitação.

Para uma órbita circular,  $a = r$ .

Logo,

$$\begin{aligned} V^2 &= \frac{2GM}{r} - \frac{GM}{r} \\ V &= \sqrt{\frac{GM}{r}} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Para uma órbita parabólica  $a$  tende a infinito, então:

$$\begin{aligned} V^2 &= \frac{2GM}{r} \\ V &= \sqrt{\frac{2GM}{r}} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Das Equações (2.2) e (2.3), podemos notar que a velocidade de um objeto em uma órbita parabólica é  $\sqrt{2}$  maior que aquela em uma órbita circular. Assim, como a Terra tem órbita circular com velocidade igual a 30,3 km/s, caso tivesse uma velocidade de aproximadamente 42 km/s, assumiria uma órbita parabólica e, como consequência, sairia do sistema solar.

A velocidade do meteoro observada na atmosfera (velocidade geocêntrica,  $V_g$ ) é a composição vetorial de sua velocidade heliocêntrica ( $V_h$ ) com a velocidade orbital da Terra ( $V_t$ ).

$$V_g = V_h + V_t \quad (2.4)$$

Supondo uma partícula no infinito e em repouso com relação à Terra, apenas pela atração gravitacional terrestre, esta partícula inicia seu movimento com uma trajetória parabólica em direção ao nosso planeta. Portanto, utilizando a relação (2.3), que corresponde a este tipo de órbita, e usando como parâmetros a massa e o raio da Terra, obtemos que a velocidade geocêntrica da partícula é de 11,2 km/s (velocidade mínima de impacto de uma partícula com a atmosfera terrestre).

Quanto menor for a velocidade da partícula, mais sujeita esta fica à ação gravitacional. Assim, o radiante aparente da partícula, ao penetrar na atmosfera, estará mais próximo do zênite (menor distância zenital) em comparação ao que seria o radiante real dessa partícula, ou seja, aquele correspondente à posição original da partícula fora da atmosfera da Terra. No caso contrário (altas velocidades) menor é o efeito de atração zenital e, assim, o radiante aparente da partícula é bem próximo ao verdadeiro. Este efeito causado pela gravidade terrestre é denominado **atração zenital** e deve ser descontado tanto para correção de posição quanto de velocidade do objeto.

A rotação da Terra também afeta a medida de velocidade de meteoros através de um efeito conhecido como **aberraçao diurna**. Sabemos que no equador terrestre a velocidade linear de rotação é máxima (cerca de 0,5 km/s), enquanto que nos pólos terrestres esta velocidade é nula. Dessa forma, quanto mais próximo do equador terrestre for a entrada da partícula na atmosfera, maior é o efeito da aberraçao diurna, pois somamos esta velocidade com aquela do meteoro. À medida que consideramos latitudes mais altas o efeito diminui, sendo completamente desprezível a partir de  $45^\circ$ . A velocidade linear de rotação da Terra  $V_{rot}$  em função da latitude  $\varphi$  do observador é dada por (McKinley, 1961):

$$V_{rot} = 0,5 \cos(\varphi) . \quad (2.5)$$

Na prática, o que temos de fato é a velocidade geocêntrica e o radiante aparente da partícula. A fim de obtermos a velocidade intrínseca e a posição do radiante verdadeiro da partícula no meio interplanetário, estas correções devem ser aplicadas.

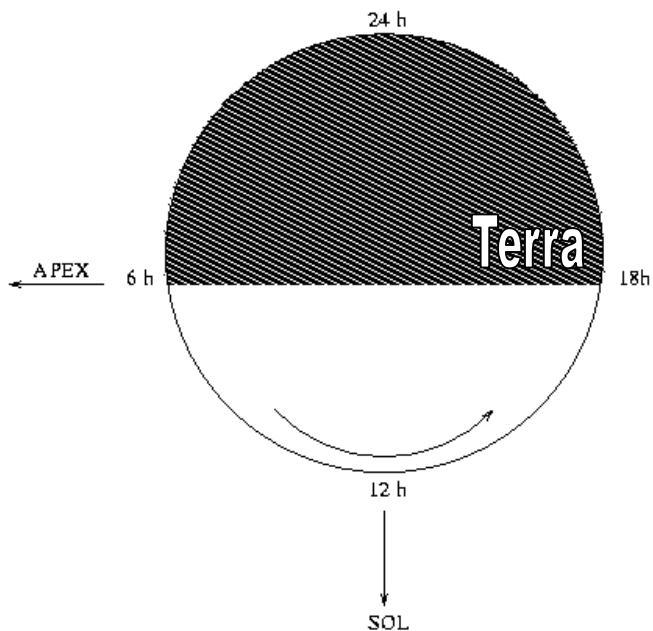
## 2.5. Efeitos Diurno e Sazonal de Meteoros

Calcula-se que, em média, haja uma ocorrência de 1.800 meteoros por hora em um período sem chuvas de meteoros (Mckinley, 1961). Há uma diferença na taxa de produção de meteoros ao longo de um mesmo dia: ocorrem cerca de 3 a 5 vezes mais meteoros na parte da manhã do que à noite. Mesmo em período de chuvas de meteoros a maior quantidade de meteoros ocorre pela manhã.

O máximo de ocorrência de meteoros no amanhecer (6h) e o mínimo no crepúsculo (18h) são uma consequência do movimento de rotação e translação da Terra (Abell, 1975). No amanhecer, o lado iluminado da Terra está voltado para a direção de deslocamento orbital terrestre (o ápex). Assim, se assumirmos uma distribuição isotrópica para os meteoróides no meio interplanetário, a probabilidade de colisão destas partículas com a Terra durante o amanhecer é maior do que ao anoitecer (Figura 2.3).

Além de haver uma variação diurna na ocorrência de meteoros, nota-se também uma variação ao longo do ano. Murakami (1955) notou, a partir de observações visuais de esporádicos, uma variação sazonal na taxa de ocorrência desses meteoros: baixa taxa nos primeiros meses do ano e um brusco aumento do meio para o final do mesmo ano, para o hemisfério norte. Weiss (1957) constatou também uma variação desse tipo para o hemisfério sul, sendo que o máximo ocorre no começo do ano enquanto que o mínimo do meio do ano em diante. Tal fato ocorre porque o ápex da Terra está acima do horizonte de um observador no hemisfério norte por mais tempo durante o mês de setembro do que durante o mês de março. E o inverso ocorre para um observador no hemisfério

sul, em que o ápex permanece mais tempo acima do seu horizonte durante o mês de março em comparação com o mês de setembro.



**Fig. 2.3. Rotação da Terra mostra que a direção de seu movimento orbital (ápex) corresponde sempre ao amanhecer de um observador.**

**FONTE: Abell (1975).**

## **2.6. Efeitos Causados por Meteoros na Alta Atmosfera Terrestre**

Perturbações na alta atmosfera devido à ação dos meteoros tem sido uma fonte de especulação e discussão. Segundo Lebedinet & Shushkova (1974), a taxa de ionização produzida na atmosfera pelo influxo de meteoróides é importante para a manutenção da camada-E da ionosfera, principalmente no período noturno. Estes autores sugeriram que em períodos de chuva de meteoros a produção de íons à noite na região E aumenta appreciavelmente. Assim, este crescimento na ionização do meio pode estar diretamente relacionado com a formação de finas camadas temporárias de íons observadas na região da camada-E.

Há também a possibilidade da formação de nuvens **noctilucentes** (luminosidade noturna) estar relacionada com os meteoros. Estas nuvens são constituídas de pequenas partículas porosas cobertas por camadas de gelo volátil, que são formadas geralmente a 85 km de altitude com uma espessura entre 0,5 km e 2 km, cobrindo uma área de  $10^4 \text{ km}^2$  a  $4,0 \times 10^6 \text{ km}^2$  (Hughes, 1978). Existem cerca de 1000 vezes mais partículas presentes nestas nuvens do que na atmosfera ao seu redor (Farlow et al., 1970).

Rosen (1969) revisou as técnicas ópticas (como por exemplo, sondas a laser e balões de medições de extinção solar) utilizadas para fazer medidas indiretas da presença de poeiras na estratosfera e constatou a existência de partículas de poeira na estratosfera com diâmetros da ordem de  $5 \times 10^{-6} \text{ m}$ , sugerindo que estas partículas poderiam resultar da ablação de meteoróides que sobreviveram à interação com a alta atmosfera. Além disso, há fortes indícios que relacionam a ocorrência de chuvas de meteoros com a formação de linhas-D de sódio (5806Å-5896Å) em espectros luminescentes (Link & Robley, 1971; Kirchhoff & Takahashi, 1984).

Utilizando técnicas de VLF (*Very Low Frequency*) foram feitas observações na região da camada-D ionosférica (ver Apêndice 2: Tabela A2.1) durante a noite que mostram perturbações na propagação destes sinais em virtude de chuvas de meteoros (Vilas-Boas et al., 1986; Kaufmann et al., 1989; Paes Leme, 1994).

Existem ainda importantes evidências que os íons metálicos, que são encontrados em altitudes entre 80 e 120 km na ionosfera terrestre, podem estar associados com a passagem de meteoros (Whitehead, 1989). Grebowsky et al. (1998) concluíram a partir de dados de 40 vôos de foguetes, que as chuvas de meteoros têm um impacto significativo na composição média da atmosfera. Zhou & Mathews (1999) observaram que ocorre uma deposição direta de material meteórico na camada-E da ionosfera entre 102 e 109 km de altitude, utilizando dados coletados do radar de Arecibo de 1987 a 1995.



## CAPÍTULO 3

### TÉCNICAS OBSERVACIONAIS

Diversas técnicas têm sido utilizadas para estudar os meteoros, dentre as quais podemos citar: observações a olho nu, câmeras fotográficas Super-Schmidt (Jones & Hawkes, 1975), telescópios (Lovell, 1954), televisão (Naumann & Clifton, 1973; Hawkes & Jones, 1986; Hawkes, 1993) e radares (Kaiser & Class, 1952).

O objetivo destas técnicas é obter o máximo de informação possível a respeito dos meteoros, tais como a orientação de suas trajetórias na atmosfera, distância, posição angular e velocidade, bem como a massa dos meteoróides que os originam. Dados fotométricos e espectroscópicos também podem fornecer informações sobre a magnitude e composição química dos mesmos.

Se todas as informações colhidas individualmente por cada técnica fossem comparadas, seria possível testar com maior confiabilidade a teoria física dos meteoros e, assim, melhor compreendermos este fenômeno. Porém pouco se tem feito nesse sentido.

#### 3.1. Observação Visual

A observação de meteoros a olho nu ou com telescópio de grande abertura é o método mais antigo utilizado pelo homem. A simples contagem de meteoros feita por um observador, em intervalos de uma hora, é convertida em **taxa horária zenithal** (THZ) de meteoros. Esta é a maior contribuição desta técnica.

Em noites de Lua Nova, a THZ média é de 10 meteoros/hora. O campo de visão do olho humano é aproximadamente de 120°. A distribuição de magnitude dos meteoros que conseguimos enxergar é: 15% mais brilhantes que 0,75 magnitude; 75% entre 3,75 e 0,75 magnitudes; e 10% mais débeis que 3,75 magnitudes (Hughes, 1978). Os telescópios também têm sido utilizados na observação de meteoros (Lovell, 1954). A magnitu-

de máxima de um meteoro observada com este instrumento é igual a seis magnitudes (Hughes, 1978).

### 3.2. Fotografia

O método fotográfico tem sido utilizado desde 1885, quando L. Weinek tirou a primeira fotografia de um meteoro em Praga. As câmeras mais utilizadas para fotografar meteoros são usualmente chamadas de **pequenas câmeras** para que haja uma distinção das **câmeras Super-Schmidt**. As pequenas câmeras conseguem detectar no máximo meteoros de magnitude zero. As Super-Schmidt, pelo fato de terem uma razão focal (i.e., a razão entre distância focal e o diâmetro da abertura da lente da câmera) igual a 0,8 e um campo angular circular de 55°, com filmes de rápida velocidade, podem detectar meteoros abaixo de magnitude 4 (Whipple, 1954). Com duas supercâmeras consegue-se ainda determinar a velocidade dos meteoros (Jones & Hawkes, 1975).

### 3.3. Televisão

Um sistema denominado LLLTV (*Low Light Level Television*) também foi desenvolvido para o estudo de meteoros. Em termos de desempenho observacional, este sistema é intermediário entre o fotográfico e o radiométrico (com radares). A magnitude limite da técnica televisiva é de magnitude 9.

Este sistema tem pequeno campo de visada (15°) o que reduz o número de trilhas registradas e não permite uma boa qualidade na razão sinal-ruído para meteoros débeis. Além disso, esta técnica só tem bom desempenho em noites bastante escuras (Lua Nova, por exemplo) e sem nuvens. Como consequência, um número muito pequeno de meteoros é observado com esta técnica.

### **3.4. Espectroscopia**

Os primeiros espectros de meteoros foram obtidos por A. S. Herschel, J. Browning e N. von Konkoly, a partir da segunda metade do século XIX. As linhas espectrais de meteoros são em sua maioria de emissão com baixo potencial de excitação. As duas componentes mais comuns e intensas são as linhas do dubleto de sódio (cor amarela) e do triplete de magnésio (cor verde)

A análise de um espectro meteórico consiste em três etapas: a determinação da escala de comprimento de onda e identificação das linhas; a calibração das intensidades das linhas; e a interpretação física do espectro. O objetivo principal desta análise consiste em conhecer a composição química do meteoróide que originou um dado meteoro.

### **3.5. Radar**

Desde 1925, a ciência de radar foi estabelecida para se estudar a alta atmosfera (acima de 80 km de altitude). Em 1939, com o início da 2<sup>a</sup>. Guerra Mundial, as pesquisas que utilizavam radares foram adiadas. Muitos meteoros detectados neste período eram confundidos com aviões, mas notou-se que os ecos dos meteoros eram bem mais curtos que aqueles dos aviões. Com o final da guerra, a técnica de radar passou a ser fortemente utilizada em programas de observações meteóricas.

A técnica de radar (ver Capítulo 4) é uma ferramenta poderosa porque é capaz de identificar meteoros produzidos por partículas com massas tão pequenas quanto  $10^{-6}$  g. Essa massa é bem inferior à massa das partículas que produzem meteoros identificados por outras técnicas (ver Tabela 3.1). Partículas com esta massa têm dimensões da ordem de 80  $\mu\text{m}$  (Hughes, 1978), sendo as menores partículas que se pode associar aos meteoros.

**TABELA 3.1 – Valores dos parâmetros típicos de meteoróides, tal como massa (m), densidade ( $\rho$ ), raio (R) e magnitude absoluta visual ( $M_v$ ), em função das técnicas de observação de meteoros.**

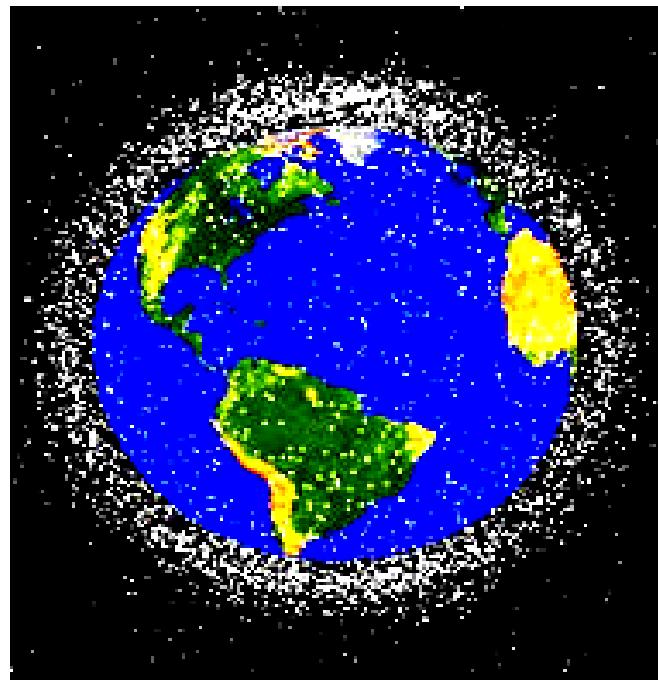
**FONTE: Hughes (1978).**

Técnica	m (g)	$\rho$ (g cm <sup>-3</sup> )	R (cm)	$M_v$
<i>Radar</i>	$\geq 10^{-6}$	3 – 0,3	$\geq 40 \times 10^{-4}$	Sem limite
<i>TV</i>	$\geq 10^{-4}$	0,8 – 0,3	$\geq 30 \times 10^{-3}$	$\leq 9$
<i>Telescópio</i>	$\geq 10^{-2}$	0,3	$\geq 20 \times 10^{-2}$	$\leq 6$
<i>Fotografia</i>	$\geq 10^{-1}$	0,3	$20 \times 10^{-2} – 10$	$\leq 4$
<i>Olho Humano</i>	$\geq 1$	0,3	$\geq 10$	$\leq 0,0$

Atualmente, com a modernização das técnicas de radar e utilizando técnicas de interferometria, esses instrumentos podem monitorar corpos provenientes do meio interestelar, interestelar e até objetos feitos pelo próprio homem, como os satélites artificiais que no final de suas vidas caem para a Terra, fragmentando-se quando em contato com a alta atmosfera, produzindo os **meteoros artificiais** (ver Seção 3.6).

### 3.6. Meteoros Artificiais

Tendo em vista o progressivo aumento de artefatos espaciais em órbita da Terra produzidos pelo próprio homem (figura 3.1), a técnica de radar vem se transformando em uma poderosa ferramenta para monitorar estes “lixos” espaciais, uma vez que ao penetrarem na atmosfera terrestre geram meteoros artificiais. É possível distinguir uma trilha de meteoros formada por um meteoróide daquela deixada por pedaços de um veículo espacial. A diferença básica é a baixa velocidade com que esse “lixo” entra na atmosfera se comparada com a velocidade dos meteoróides.



**Fig. 3.1. Concepção artística da distribuição de artefatos espaciais ao redor da Terra.**

***FONTE: Headline Universe (1995).***

Além disso, alguns meteoros artificiais são criados a partir de experimentos em que se conhece a composição química, massa e velocidade dos mesmos. Neste caso, os meteoros artificiais servem como objetos de calibração para os modelos teóricos de meteoróides.



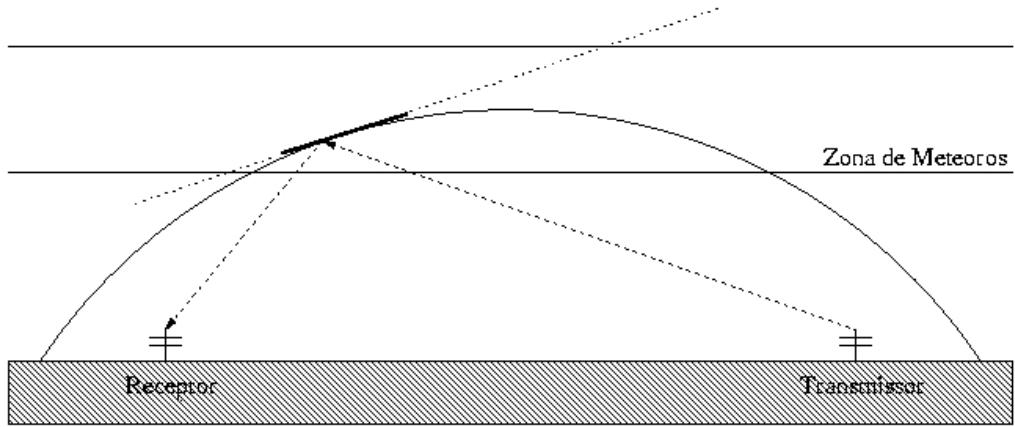
## CAPÍTULO 4

### TÉCNICA DE RADAR

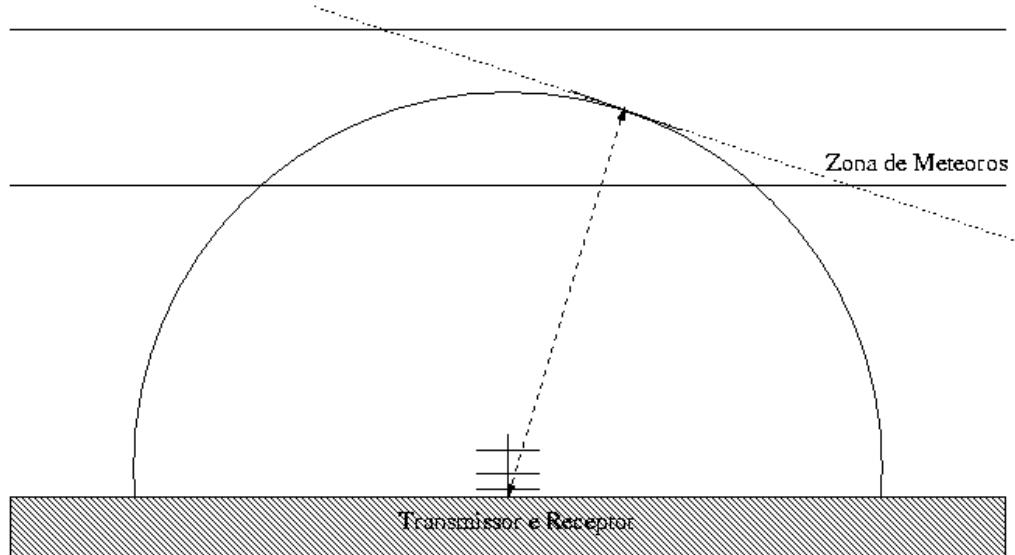
O **RADAR** (*RAdio Detection And Ranging*) é uma variação da técnica de rádio. É um dispositivo eletrônico com a finalidade de estender a limitação de observação da visão humana, pois é capaz de detectar e localizar objetos em condições climáticas adversas.

Um radar é composto basicamente por uma antena transmissora que emite pulsos eletrromagnéticos na faixa de rádio freqüências e por uma antena receptora. Dependendo das características do meio pelo qual os pulsos transmitidos se propagam, estes podem ser refletidos ou espalhados. Os pulsos refletidos de forma especular são detectados pelo radar como **ecos**.

Existem duas técnicas básicas para radares: bi-estático ou *forward-scatter* e o mono-estático ou *backscatter*. A diferença essencial entre estas técnicas é que a primeira consiste em ter um transmissor situado a centenas de quilômetros de distância dos receptores, enquanto que a segunda possui o transmissor no mesmo local dos receptores. Nesta configuração, o radar bi-estático detecta meteoros com direções tangentes a elipsóides com focos no transmissor e no receptor (Figura 4.1). O radar mono-estático é o caso limite do radar bi-estático em que os focos são coincidentes, fazendo com que apenas os meteoros tangentes às esferas centradas nas antenas transmissora e receptora sejam detectados. Desta forma, só aqueles meteoros que estão contidos em planos que fazem  $90^\circ$  com a direção do pulso emitido pelo radar são detectados (Figura 4.2).



**Fig. 4.1. Configuração para o radar bi-estático (*forward-scatter*).**



**Fig.4.2. Configuração para o radar mono-estático (*backscatter*).**

Os principais parâmetros de um meteoro fornecidos por um radar são sua distância (alcance), direção (posição angular) e velocidade. O alcance  $R$  do radar é determinado pelo intervalo de tempo  $\Delta t$  que o pulso transmitido leva para ir até o meteoro e voltar. Sendo a velocidade de deslocamento do pulso eletromagnético igual à velocidade da luz  $c$ , então:

$$R = c \frac{\Delta t}{2} \quad (4.1)$$

A posição angular do meteoro pode ser determinada a partir da direção de chegada (ou fase) da frente de onda refletida pela trilha do meteoro. Na prática isso é feito com um sistema interferométrico (Felli & Spencer, 1988).

Por fim, existem duas velocidades associadas a um meteoro: **velocidade radial** e **velocidade geocêntrica** (ver Seção 4.5). A primeira velocidade está relacionada com o deslocamento sofrido pela trilha meteórica ao longo de sua trajetória devido aos ventos da alta atmosfera, sendo obtida por efeito Doppler. A segunda é a velocidade de entrada do meteoróide na atmosfera, sendo inferida a partir da figura de difração de Fresnel da potência recebida de um radar pulsado (McKinley, 1961).

#### 4.1. Equação do Radar

Uma antena isotrópica é aquela cuja potência do pulso transmitido é a mesma para todas as direções. Assim, a densidade de potência medida a uma distância  $R$  de um radiador isotópico será sua potência transmitida  $P_t$  atenuada pelo quadrado dessa distância em todo o espaço.

$$P_r = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad (4.2)$$

Um irradiador desse tipo não existe na prática. Qualquer antena é diretiva, i.e., possui um ganho  $G$  em uma dada direção. Para a direção de ganho máximo  $G_0$ , a densidade de potência transmitida será:

$$P_r = \frac{G_0 P_t}{4\pi R^2} \quad (4.3)$$

Ao atingir um alvo, a onda transmitida será espalhada de acordo com a seção de choque  $\sigma$  desse alvo. No caso ideal, esta onda é refletida de forma isotrópica. A radiação refletida na mesma direção da onda incidente gera o eco que é captado pelo radar (neste

caso, mono-estático). Assim, a potência recebida será igual à densidade de potência refletida atenuada também pelo quadrado da distância  $R$  percorrida em todo espaço até a antena receptora:

$$P_r = \frac{G_0 P_t \sigma}{(4\pi R^2)^2} \quad (4.4)$$

Quando este eco atinge a antena, apenas uma fração dele é absorvida pela mesma. Definimos, assim, uma área efetiva da antena  $A_e$ . A potência recebida passa então a ser expressa como:

$$P_r = \frac{G_0 P_t \sigma}{(4\pi R^2)^2} \cdot A_e \quad (4.5)$$

A partir desta área é definido um ângulo sólido que representa o lóbulo principal da antena. Esse lóbulo corresponde à direção de ganho máximo em potência da antena (diretividade da antena  $D$ ). Sendo  $\Omega_A$  o ângulo sólido total do feixe da antena, então:

$$D = G_0 = \frac{4\pi}{\Omega_A} \quad (4.6)$$

Como  $\Omega_A = \lambda^2/A_e$ , então a área efetiva e a diretividade da antena se relacionam da seguinte forma:

$$D = G_0 = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (4.7)$$

Logo,

$$A_e = \frac{\lambda^2 G_0}{4\pi} \quad (4.8)$$

Finalmente, substituindo a Equação (4.8) em (4.5), a potência recebida pelo radar, conhecida com **equação de radar**, pode ser escrita como:

$$P_r = \frac{P_t G_0^2 \lambda^2 \sigma}{64\pi^3 R^4} \quad (4.9)$$

A Equação (4.9) é a relação para a potência recebida por um radar através de seu lóbulo principal.

#### 4.2. Alcance Máximo

A partir da equação de radar, podemos obter uma relação para o alcance máximo (Skolnick, 1962):

$$R_{máx} = \left( \frac{P_t G_0 A_e \sigma}{16\pi^2 S_{min}} \right)^{1/4} \quad (4.10)$$

Sendo,

$R_{máx}$  – alcance máximo do radar

$P_t$  – potência transmitida

$G_0$  – ganho máximo da antena

$A_e$  – área efetiva da antena

$\sigma$  – seção de choque do alvo (trilha de meteoro)

$S_{min}$  – sinal mínimo detectável

A maioria dos parâmetros da Equação (4.10) é de fácil controle, exceto a seção de choque do alvo. Pela equação de radar, se desejamos trabalhar com longos alcances, então a potência transmitida deve ser alta e a energia irradiada deve estar contida em um feixe estreito (antena com alto ganho de transmissão). A energia do eco recebida deve ser coletada por uma antena de grande área efetiva (antena com alto ganho de recepção), devendo o receptor ter alta sensibilidade a sinais fracos.

Contudo, apenas a equação de radar não é capaz de prever, com um satisfatório grau de precisão, o valor real do alcance de um dado radar. Os valores de alcances fornecidos pela Equação (4.10) são, em geral, bastante otimistas. Na prática, o alcance real é menor que a metade daquele fornecido pela equação de radar. Parte desta discrepância é devido ao fato da Equação (4.10) não explicitar vários termos de perda que ocorrem no radar. Um outro fator relevante é a natureza estatística (ou imprevisível) de vários parâmetros desta equação.

O sinal mínimo detectável e a seção de choque do alvo são de natureza estatística e devem ser expressos de maneira estatística. Há outros termos estatísticos que não aparecem na Equação (4.10), mas que influenciam significativamente no desempenho do radar. Estes termos decorrem das condições meteorológicas ao longo do caminho de propagação da radiação transmitida pelo radar e refletida pelo alvo, bem como dependem do desempenho e modo de operação do sistema do radar (ver Seção 4.3).

### 4.3. Sensibilidade Mínima, Ruídos de Receptores, Ruídos Cósmicos

O mais fraco sinal que um receptor pode detectar é denominado **mínimo sinal detectado**. A especificação de sinal mínimo é por vezes difícil por causa de sua origem estatística e do critério adotado para decidir se um sinal é ou não proveniente de um alvo real. O critério de detecção, em geral, estabelece um ruído de referência na saída do receptor. Se o sinal de saída excede o ruído de referência, assume-se que um sinal foi detectado.

Além disso, o sinal detectado tem que competir com o ruído térmico gerado pelo receptor do radar, bem como com ruídos na faixa de rádio produzidos pelo Sol e por fontes galácticas. Um resistor a temperatura  $T$ , em um receptor ideal, produz uma potência térmica de ruído  $P_R$  igual a:

$$P_R = kT\Delta f, \quad (4.11)$$

sendo  $k$  a constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/°C) e  $\Delta f$  a largura de banda total do receptor medida entre os pontos que definem a meia potência da curva de resposta do

mesmo. Por convenção a temperatura típica ambiente ( $T_0$ ) é da ordem de 300 K. Nenhum receptor é perfeito, e sua potência de ruído pode ser expressa em termos de uma temperatura equivalente  $T_R$ :

$$P_R = kT_R\Delta f \quad (4.12)$$

Quando a potência de ruído é expressa em decibéis<sup>1</sup> (db), esta é chamada de **figura de ruído** ( $F$ ), que é usada para especificar o desempenho do receptor. Assim, melhor será o receptor quanto mais próximo do valor unitário estiver o  $F$ , ou seja, zero db. A potência de ruído expressa em termos da figura de ruído é (McKinley, 1961):

$$P_R = kT_0(F - 1)\Delta f \quad (4.13)$$

A potência do ruído  $P_A$  devido a fontes extraterrestres, pode ser escrita como  $P_A = kT_A\Delta f$ , onde  $T_A$  é a temperatura equivalente de ruído no receptor. Temperaturas de ruído equivalentes podem exceder milhões de graus, mas isto não deve ser confundido com a temperatura térmica da fonte atual, a qual pode ser bem menor.

Assim, a potência total de ruído ( $P_R^t$ ) pode ser expressa como:

$$P_R^t = (T_R + T_A)kT\Delta f \quad (4.14)$$

Existem ainda outras fontes de ruído para radares meteóricos que estão associadas à dinâmica da ionosfera, a efeitos de tempestades elétricas (relâmpagos) e geomagnéticas, bem como efeitos de propagação da radiação no meio atmosférico (ver Seção 4.3.1).

---

<sup>1</sup> Por definição, um decibel (db) é igual a  $10 \log[P_{ruído}/P_{sinal}]$ . Então, quando a potência de ruído é idêntica a potência do sinal, temos  $db = 0$ .

#### 4.3.1. Efeitos de Propagação

Na análise do desempenho de um radar é conveniente assumir que tanto o radar quanto o alvo em estudo se encontram em ambiente “livre” de atenuação. Entretanto, não há radares operando nestas condições. Na maioria dos casos, a superfície terrestre e o meio através do qual a radiação emitida pelo radar se propaga têm um efeito significativo no desempenho do radar. Os principais efeitos causados na propagação do sinal de um radar são a atenuação e a refração atmosféricas.

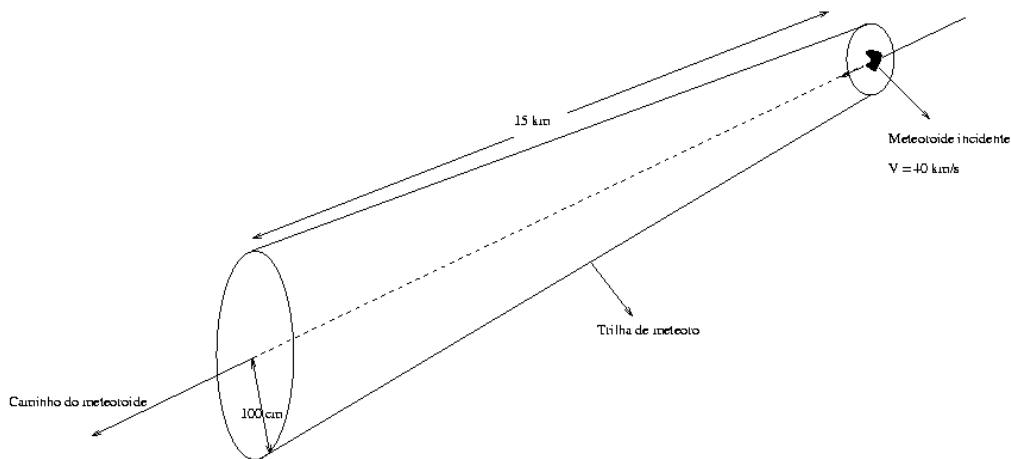
1) Atenuação atmosférica: os gases e o vapor d’água que compõe a atmosfera terrestre atenuam a radiação eletromagnética. O resultado é uma perda de intensidade da radiação que se propaga neste meio. A quantidade de radiação atenuada depende da freqüência de operação do radar, assim como dos constituintes do meio atravessado. O fator de atenuação atmosférica é dado por  $\exp(-2\beta R)$ , sendo  $\beta$  a constante de atenuação do meio e  $R$  o alcance do radar. Se  $\beta$  for grande ou se o caminho de propagação for longo, então o fator de atenuação deve ser incluído na equação de radar. Quando este fator é incluído, a solução da equação de radar torna-se mais complicada.

2) Refração atmosférica: a densidade da atmosfera não é uniforme com a altitude, o que resulta em uma curvatura (desvio) no sinal do radar da mesma forma que a luz se curva ao passar por um prisma. O vapor d’água é o principal componente atmosférico responsável por este efeito. Em alguns casos, como por exemplo a utilização de radares de alta potência, múltiplas refrações podem resultar em um aumento no alcance do radar. Esta condição é chamada **super-refração**, que é uma propagação anômala. A camada-F, em que a densidade iônica é bastante alta, também produz refração na faixa de rádio freqüências. Entretanto, no caso de um radar meteórico, os efeitos de refração são praticamente desprezíveis com relação à atmosfera neutra (vapor d’água) e ionosfera.

#### 4.4. Trilhas de Meteoros e Duração de Ecos

Sabemos que dependendo do ângulo de incidência, massa, velocidade e estrutura do meteoróide, uma trilha de meteoro pode atingir extensões entre 7 km e 20 km, com raio em torno de 1m (Figura 4.3).

Em geral, a velocidade típica das substâncias ejetadas de um meteoróide é uma composição da velocidade de ablação (velocidade de escape da superfície do meteoróide, que é cerca de 1 km/s) com a velocidade de entrada do meteoróide na atmosfera. Desta forma, a energia cinética destas substâncias é da ordem de dezenas ou centenas de elétrons-volts.



**Fig. 4.3. Esquema representativo de uma trilha de meteoro com aproximadamente 15 km de extensão gerada por um meteoróide com velocidade de 40 km/s.**  
**FONTE: Hughes (1978).**

Se considerarmos a massa molecular média destas substâncias igual a 30 (lembrando que uma unidade de massa atômica é  $1,67 \times 10^{-24}$  g) e que estas possuem velocidades geocêntricas de 40 Km/s, podemos estimar a energia cinética envolvida no processo:

$$\frac{1}{2} (30 \times 1,67 \times 10^{-24}) \times (40 \times 10^5)^2 = 4 \times 10^{-10} \text{ ergs} = 250 \text{ ev.} \quad (4.15)$$

Esta energia cinética é alta o suficiente para excitar e ionizar as substâncias removidas da superfície do meteoróide e da própria atmosfera, uma vez que os potenciais de excitação e ionização destes elementos químicos são da ordem de 2 ev a 15 ev. Portanto, o meteoróide ao interagir com a atmosfera gera uma trilha de gás ionizado. As trilhas de meteoros possuem uma densidade linear crítica  $\alpha$  igual a  $2,4 \times 10^{14}$  elétrons/m (Hughes, 1978) e temperaturas entre 2000 K e 5000 K (Ceplecha et al., 1998).

Uma trilha de meteoros pode ser dividida em duas classes de acordo com a densidade linear de elétrons contida na mesma. Se a densidade de uma trilha é menor que uma densidade  $\alpha$ , então esta é dita **subdensa**. As ondas de rádio em uma trilha subdensa penetram livremente na coluna da trilha e cada elétron atua como uma fonte espalhadora. Se a densidade de uma trilha é maior que  $\alpha$ , então esta é dita **superdensa**. Em trilhas superdensas, as ondas de rádio não penetram no meteoro e são completamente refletidas pelos elétrons, pois atuam como uma superfície cilíndrica especular devido à alta densidade dessas partículas carregadas.

A potência máxima do eco recebida pelo radar em função da densidade linear eletrônica  $\alpha$  de uma trilha meteórica é dada por (Hughes, 1978):

$$P_r = \frac{P_t G_0^2 \lambda^3 \alpha^2 r_e^2}{32\pi^2 R^3} \quad ; \alpha < 2,4 \times 10^{14} \text{ m}^{-1} \quad (4.16)$$

$$P_r = \frac{P_t G_0^2 \lambda^3 \alpha^{\frac{1}{2}} r_e^{\frac{1}{2}}}{105\pi^2 R^3} \quad ; \alpha > 2,4 \times 10^{14} \text{ m}^{-1} \quad (4.17)$$

Sendo,

$P_r$  – Potência Recebida

$P_t$  – Potência Transmitida

$R$  – alcance do radar

$G_0$  – ganho da antena (figura de radiação)

$\lambda$  – Comprimento de onda do pulso emitido

$r_e = e^2/mc$  – raio clássico do elétron

A potência dos ecos de trilhas subdensas cresce rapidamente até atingir um pico e depois decai exponencialmente. O tempo de decaimento  $T_{sub}$ , que é definido como a medida do tempo que a amplitude do eco leva para chegar a um valor de 1/e da sua amplitude máxima (McKinley, 1961), é dado por (Hughes, 1978):

$$T_{sub} = \frac{\lambda^2}{16\pi^2 D} \quad (4.18)$$

Sendo D o coeficiente de difusão ambipolar do meio.

No caso de trilhas superdensas, o crescimento da amplitude do eco é mais gradual e se mantém por muito tempo em torno do valor de máxima amplitude. Neste caso, o tempo de decaimento  $T_{super}$  corresponde a duração do eco acima de um dado nível de referência absoluta que pode ser escolhido igual ao nível de ruído do receptor e seu valor é dado por (Hughes, 1978):

$$T_{super} = \frac{\lambda^2 \alpha}{4\pi^2 D} \quad (4.19)$$

Ecos de longa duração podem sofrer interferências devido a freqüências refletidas de duas ou mais regiões distintas da trilha. Estas diferentes regiões de reflexão são consequência da quebra da trilha causada por ventos na alta atmosfera. O tempo de duração típico dos ecos subdensos é da ordem de 0,1 segundo (teoria clássica dos meteoros), enquanto que as durações dos ecos superdensos podem se estender de segundos até vários minutos (McKinley, 1961).

#### 4.5. Método para Determinação de Velocidades Geocêntricas

Segundo McKinley (1961), pela teoria clássica de Fresnel, para um radar de pulsos co-  
rentes, as expressões para a potência recebida antes ( $-s$ ) e após ( $+s$ )  $t_0$ , instante equiva-  
lente a um ponto da trilha que está a menor distância ( $R_0$ ) do radar, são:

$$P_{r+d}(-s) = \frac{I_r^2}{\pi^2 x^2} + I_d^2 + \frac{2I_r I_d}{\pi x} \operatorname{sen} \left( \frac{\pi x^2}{2} + \Psi \right) \quad (4.20)$$

$$P_{r+d}(-s) = \frac{I_r^2}{\pi^2 x^2} + E^2 + \frac{2I_r}{\pi x} E \operatorname{sen} \left[ \frac{\pi x^2}{2} - \tan^{-1} \left( \frac{I_r - I_d \operatorname{sen} \Psi}{I_r + I_d \operatorname{sen} \Psi} \right) \right] \quad (4.21)$$

Sendo,

$I_r$  – potência do eco recebida;

$I_d$  – potência recebida direto do transmissor;

$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} (2R_0 - D)$  – diferença de fase entre a onda refletida pela trilha e aquela proveni-  
ente do transmissor;

$D$  – menor distância entre o receptor e o transmissor para que haja uma diferença de  
fase  $\psi$ ;

$$E = 2I_r + I_d - 2\sqrt{2}I_r I_d \operatorname{sen} \left( \Psi - \frac{\pi}{4} \right).$$

Fazendo-se a aproximação que  $2s = x(R_0\lambda)^{1/2}$ , sendo  $s = V\tau$ , então o argumento  $\pi x^2/2$   
dos termos de oscilação das Equações (4.20) e (4.21) é igual à  $2\pi V^2 \tau^2 / R_0 \lambda$ . Assim,  
definimos uma freqüência instantânea de oscilação  $f_i$ , tal que:

$$\operatorname{sen}(2\pi f_i) = \operatorname{sen}(2\pi V^2 \tau^2 / R_0 \lambda) \quad (4.22)$$

Dessa forma, a partir da Equação (4.22) obtemos a seguinte relação:

$$f_i = \frac{2V^2}{R_0 \lambda} \tau \quad (4.23)$$

Sendo,

$f_i$  – freqüência de oscilação da difração;

$V$  – velocidade geocêntrica do meteoro;

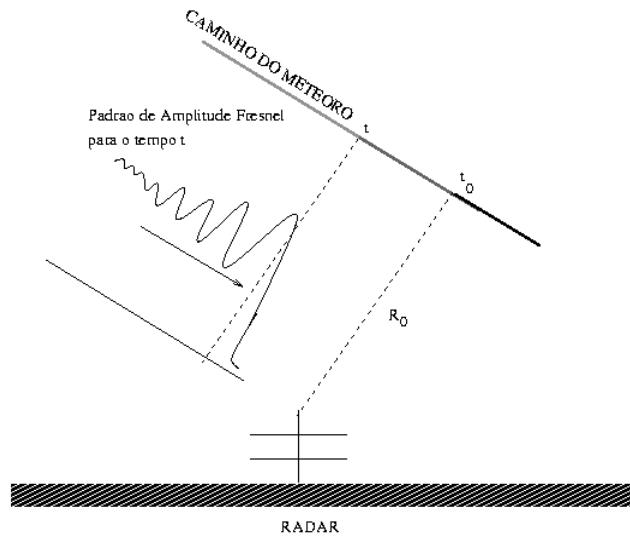
$R_0$  – distância mínima da trilha ao radar;

$\lambda$  – comprimento de onda do pulso incidente;

$\tau = t - t_0$ .

Os gráficos de  $f_i$  versus  $\tau$  fornecem diretamente a velocidade do meteoro em estudo (McKinley 1961).

A técnica utilizada pelo SKiYMET para a determinação da velocidade de entrada de meteoros segue, em linhas gerais, os mesmos princípios anteriormente apresentados, porém obedecendo aos critérios expostos por Cervera et al. (1997). O método faz uso do fato que se uma trilha de meteoro é formada na atmosfera, esta pode ser “iluminada” por ondas de rádio que incidem perpendicularmente nesta trilha. Assim, como a cabeça do meteoro impõe um limite geométrico à trilha, então a quantidade de radiação recebida pelo radar apresenta um padrão de difração de Fresnel. Este padrão se desloca pelo radar à medida que a frente da trilha (ou cabeça do meteoro) se move na atmosfera. A Figura 4.4 mostra uma trilha meteórica dentro do feixe de radiação de um radar monostático, bem como o padrão de difração que se forma próximo ao radar.



**Fig. 4.4. Geometria do caminho de um meteoro em relação a um radar monostático (backscatter). O padrão de difração de Fresnel relativo ao instante  $t$  também é mostrado. O instante  $t_0$  corresponde à menor distância da trilha meteórica ao radar ( $R_0$ ).**

A partir de medidas do número de oscilações das amplitudes associadas com padrão de difração referente à trilha detectada, em função do tempo, podemos inferir a velocidade do meteoro (Hocking, 2000). Cabe ressaltar que este padrão de Fresnel primeiramente surge antes do pico de amplitude do sinal do meteoro e depois persiste após este pico. Antigamente, costumava-se utilizar apenas as oscilações de amplitudes após a ocorrência do pico do sinal meteórico (McKinley, 1961). Atualmente, para o cálculo de velocidades geocêntricas são utilizadas as medidas de oscilações de amplitudes complexas antes do referido pico (Cervera et al., 1997).

## CAPÍTULO 5

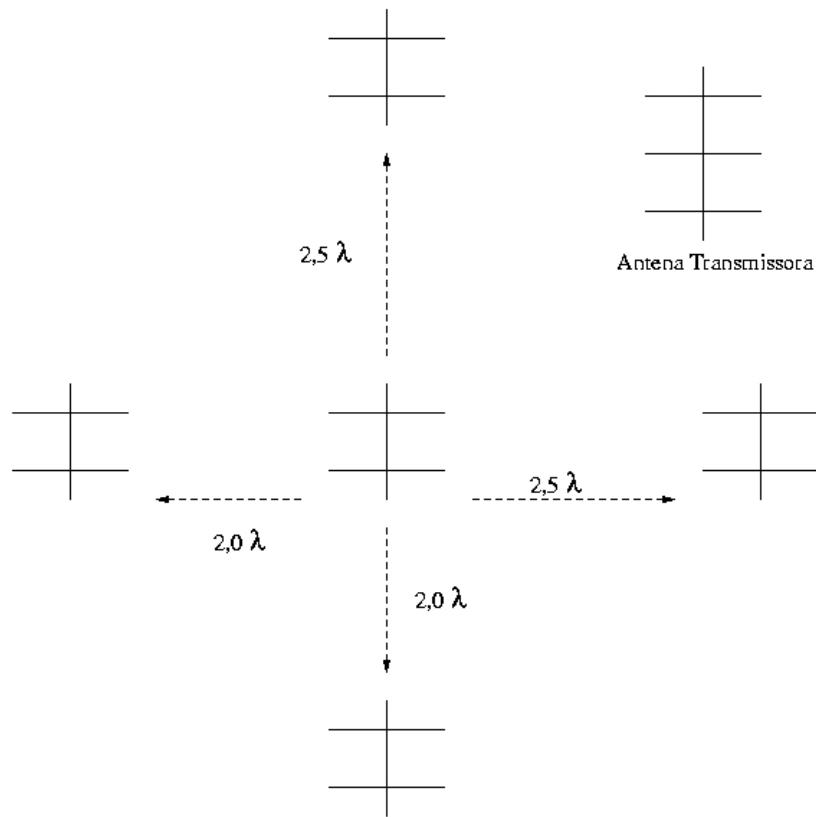
### OBSERVAÇÕES E ANÁLISES

#### 5.1. Radar SKiYMET

Observações de meteoros esporádicos e chuvas de meteoros foram realizados no período de 1999 a 2001, utilizando o radar científico SKiYMET (*VHF All-Sky Interferometric Meteor Radar*). Este radar está localizado no INPE de Cachoeira Paulista (São Paulo, Brasil), operando em 35,24 MHz. Este instrumento utiliza cinco antenas yagis receptoras de dois elementos, formando uma base interferométrica (Figura 5.1). A transmissão de pulsos eletromagnéticos é feita por uma única antena yagi de três elementos situada próxima a este arranjo, caracterizando o SKiYMET como um radar de retro-espalhamento (*backscatter*). Estes pulsos possuem larguras de  $13,3\mu\text{s}$  e são emitidos a uma potência de 6 ou 12 kW, em intervalos de 0,5 ms aproximadamente (o inverso desta grandeza corresponde à freqüência de repetição de pulsos do radar). O radar tem uma resolução espacial de 2 km no céu, ou seja, objetos com mesmo azimute podem ser distinguidos se a distância mínima entre os mesmos for deste valor. Caso isto não ocorra, caracteriza-se uma **ambigüidade** no sinal recebido.

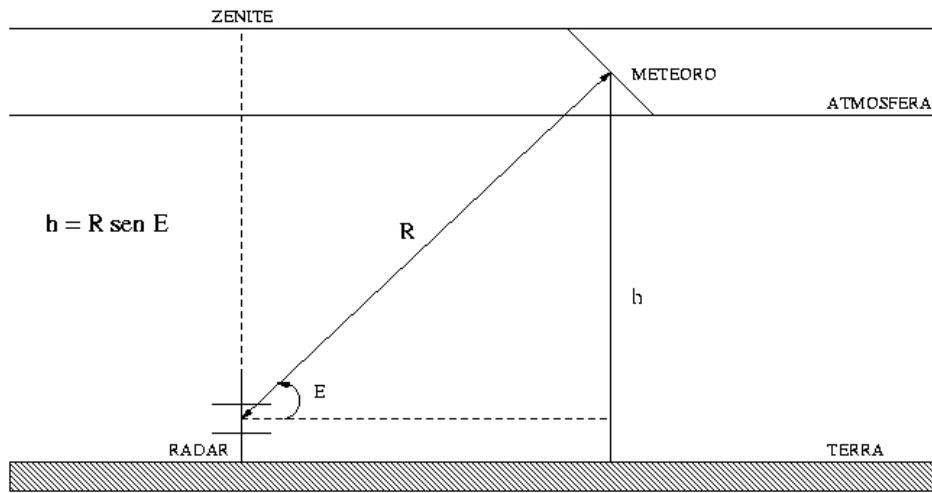
A **Freqüência de Repetição de Pulsos** (FRP) do radar é igual a 2144 Hz. Esta característica do SKiYMET permite que a velocidade de entrada de muitos meteoros na atmosfera seja determinada (Cervera et al., 1997). Conhecendo-se a distância dos meteoros (alcance do radar) e suas coordenadas horizontais locais (azimute e elevação) é possível determinarmos a altura dos mesmos (Figura 5.2).

O SKiYMET foi desenvolvido para empregar técnicas interferométricas usando um espaçamento ideal entre as antenas, o que possibilita a cobertura completa do céu acima do horizonte (sistema *all-sky*). Esta técnica permite ainda determinar a localização angular do objeto detectado a partir de informações das fases de cada uma das antenas receptoras.



**Fig.5.1. Arranjo das cinco antenas receptoras do radar SKiYMET. As antenas em forma de cruz assimétrica estão separadas por  $2,0\lambda$  e  $2,5\lambda$  ao longo dos eixos horizontal e vertical, onde  $\lambda$  é comprimento de onda do radar ( $\sim 8,5\text{m}$ ). A posição da antena transmissora não é crítica, podendo ser colocada em qualquer local convenientemente próximo ao arranjo receptor.**

As principais medidas fornecidas pelo programa incorporado ao sistema do SKiYMET são: data e hora (ano, mês, dia, hora, minuto, segundo e milisegundo); o alcance do eco; a altura do meteoro; a distância zenital e o ângulo azimutal do meteoro; o nível de ambigüidade; o erro de fase entre os pares de antenas; o tempo de duração da trilha meteórica; e velocidade de entrada do meteoróide na atmosfera. Na Seção 5.1.1 é feita uma descrição dos critérios utilizados pelo sistema do SKiYMET para discriminar se o eco detectado é ou não devido a um meteoro.



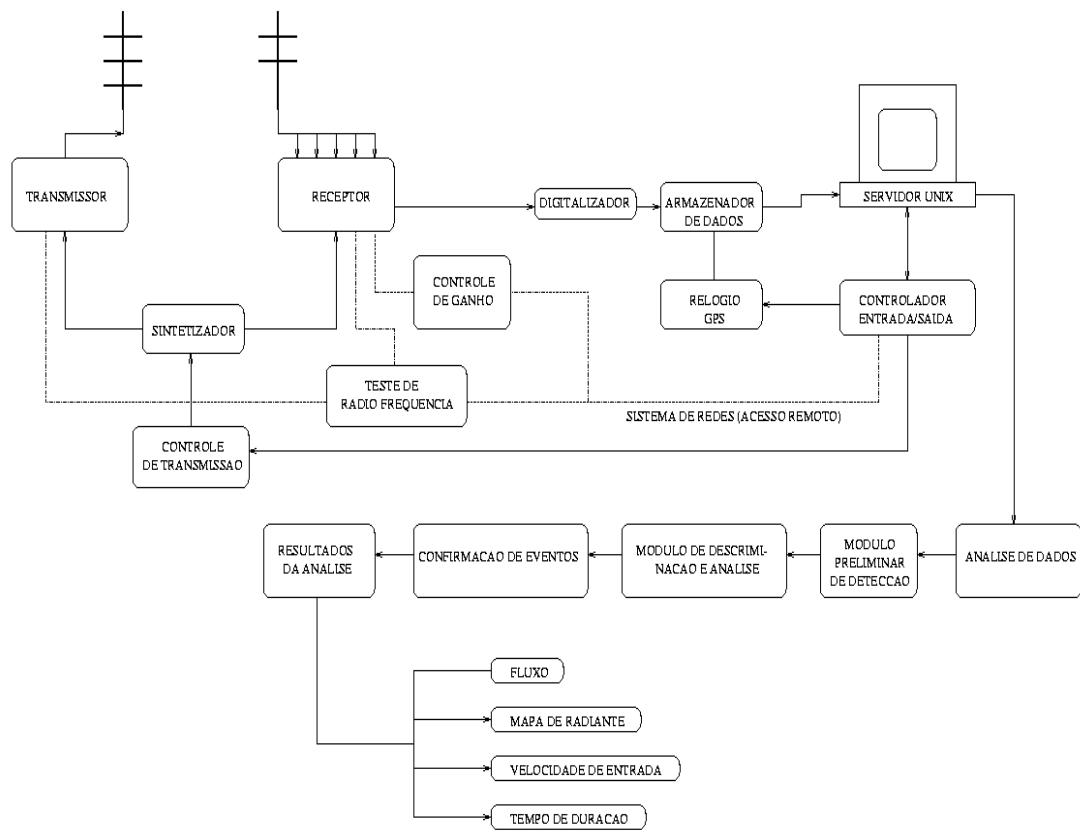
**Fig.5.2. Configuração da detecção de uma trilha meteórica por um radar *backscatter*. O Alcance (R) do radar se relaciona com a elevação (E) e a altura (h) da trilha de meteoro conforme a equação a seguir:  $h = R \sin E$ .**

### 5.1.1. Critérios de Seleção de Meteoros

O SKiYMET, cujo diagrama de bloco é apresentado na Figura 5.3, possui um programa próprio para detectar e discriminar meteoros de outros eventos. A detecção é feita a partir de dois estágios de análises consecutivos. O primeiro consiste na identificação de candidatos a meteoro por um programa denominado “detector”. Nessa etapa, são armazenados os dados de possíveis meteoros para serem re-analisados posteriormente. Estes arquivos preliminares incluem apenas os dados obtidos 1s antes e até 3s após o registro da amplitude máxima do sinal do possível meteoro. O segundo estágio da análise (“skiyccor”) re-avalia os ecos registrados, porém com muito mais detalhes, para confirmar se o eco foi ou não gerado por um meteoro.

O primeiro estágio (detecção de meteoros) é o processo mais difícil da análise de meteoros (Hocking et al., 2001). O objetivo deste estágio é encontrar os ecos de meteoros e discriminá-los daqueles, também de curta duração, que não são devido aos meteoros. As características que permitem distinguir os meteoros dos demais eventos são a curta duração dos meteoros (trilhas subdensas), o crescimento rápido e a queda temporal qua-

se-exponencial do sinal detectado. Se o sinal cresce lentamente, então o dado é rejeitado como sendo ou de um avião, ou como ecos vindos da camada-E da ionosfera, ou como algum outro tipo de contaminação. É preciso ainda garantir que o eco dure relativamente pouco (menos que 2 ou 3 s). Uma aeronave, por exemplo, dura cerca de 10 s ou mais para atravessar a zona do feixe de radiação emitido pelo radar. Assim, se a amplitude do sinal recebido retornar ao normal em 3 s, maior é a possibilidade que um meteoro tenha gerado tal eco. Contudo, apenas este teste não é suficiente para garantir que o sinal é de fato produzido por um meteoro. É necessário verificar se a amplitude média é comparável ao ruído após 3s do pico e se o meteoro surge repentinamente dentro de um tempo de 0,3 s ou menos.



**Fig.5.3. Diagrama de Bloco do SKiYMET.**

Pulsos eletromagnéticos gerados por relâmpagos também são fenômenos captados por radares meteóricos. A duração de um relâmpago sempre excede o período entre os pulsos do radar. Por este motivo, seus efeitos podem ser encontrados em sucessivos pulsos. Quando isto ocorre, o sinal tende a mostrar variações substanciais na amplitude durante seu tempo de vida, se comparada com a suave queda de sinais provenientes de meteoros. A fim de excluir os sinais de relâmpagos e de outros efeitos (tais como a reflexão da camada-E esporádica), analisa-se a variação da amplitude do sinal em um intervalo de 900 ms após o pico. Nesta etapa, primeiro se identifica a posição equivalente a 30% do valor do pico da amplitude do sinal. Em seguida, a amplitude do eco é examinada além deste ponto, para verificar se a amplitude continua decrescendo ou se cresce acima de 70% de sua amplitude inicial. Quando este último caso ocorre, o eco detectado não possui características meteóricas, sendo rejeitado. Este método mostrou-se muito eficiente para remover sinais associados com relâmpagos. Todavia, este algoritmo tem a desvantagem de remover também os meteoros superdensos. Porém, como este tipo de meteoro representa uma pequena fração do número total de ocorrência dos meteoros, a perda não é tão significativa. Este teste ainda rejeita meteoros débeis cuja razão sinal-ruído seja muito pequena.

No segundo estágio da análise (confirmação de meteoros), os dados gravados na primeira etapa são submetidos a testes mais rigorosos, a fim de assegurar que os “possíveis meteoros” registrados sejam realmente meteoros. Estes eventos são analisados através do programa “skiycorr” que repete alguns passos da etapa anterior, porém com maior exigência nos critérios de rejeição. Uma vez conhecidos os verdadeiros meteoros, o programa passa então a determinar a localização destes meteoros no céu (alcance, azimute e distância zenital), bem como realiza uma série de cálculos que determinam o tempo de duração, a velocidade radial e a velocidade de entrada destes meteoros. Os resultados desta análise são gravados em arquivos ASCII (formato de texto) a partir dos quais podem ser feitos diversos estudos sobre os meteoros. Antes de aplicar os testes desse estágio, é importante registrar a diferença de fase intrínseca entre os pares de antenas receptoras. Estas diferenças de fases devem ser conhecidas para que as posições dos meteoros sejam inferidas com precisão.

## 5.2. Análise das Chuvas de Meteoros

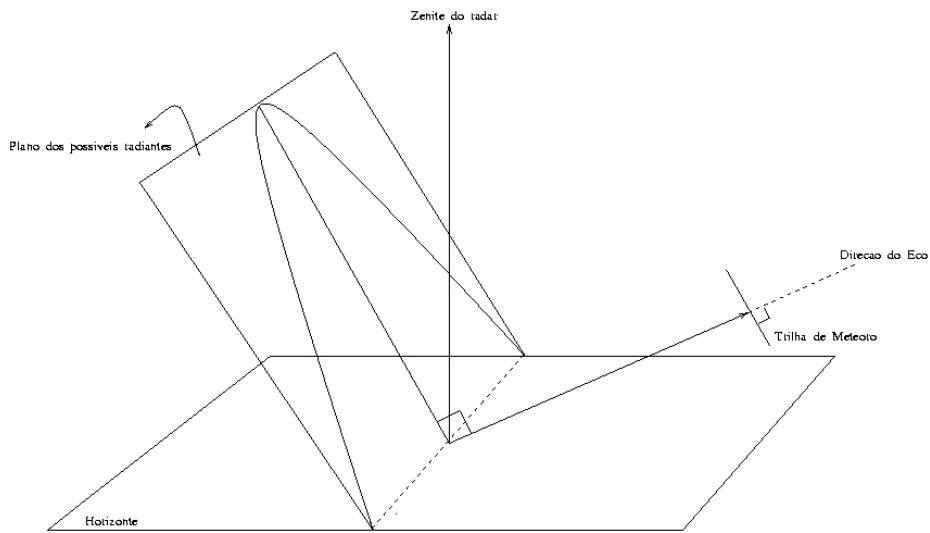
Neste Capítulo apresentamos o método utilizado para estudar as chuvas de meteoros. Delta Aquaridas do Sul (DAS) é uma das chuvas de nossa amostra neste trabalho e foi escolhida para ilustrar algumas etapas do método de análise empregado.

### 5.2.1. Determinação dos Radiantes

Quando um meteoro é formado pode ser detectado por um radar pelo fato de ser uma trilha de plasma. Se o radar é mono-estático, então a trilha detectada é perpendicular a um vetor com origem no radar que aponta na direção da trilha. Dessa forma, podemos gerar um círculo máximo no céu, centrado no radar, que representa a posição de diferentes radiantes que seriam possíveis candidatos a formar tal meteoro (Figura 5.4), o qual possui uma dada elevação e azimute. Todavia não se sabe qual desses possíveis radiantes sobre o círculo máximo é a fonte real da trilha. Se um outro meteoro é detectado, um outro círculo de possíveis radiantes é criado, e assim sucessivamente.

Estes círculos máximos podem ser gerados em coordenadas equatoriais celestes para cada meteoro detectado, quando conhecemos o dia e hora da detecção, a elevação e o azimute, bem como a latitude e longitude da estação de radar (observador). Se há uma única fonte no céu da qual surgem vários meteoros, tal como uma chuva de meteoros, então os círculos máximos irão se interceptar em um único ponto que corresponde à posição exata da fonte em ascensão reta e declinação.

A posição do radiante das chuvas de meteoros foi determinada a partir do programa RADIANTS (desenvolvido pelo Dr. Clemesha, INPE/ Divisão de Aeronomia) que fornece as coordenadas equatoriais celestes do radiante utilizando a metodologia descrita no parágrafo anterior. Outras versões de algorítimos similares foram apresentadas por Jones & Morton (1982) e Jones & Brown (1994).



**Fig. 5.4. Representação do plano que contém o círculo máximo de possíveis radiantes que podem gerar o meteoro detectado pelo radar. Este plano é perpendicular à direção do eco captado pela condição imposta na configuração de um radar mono-estático (*backscatter*).**

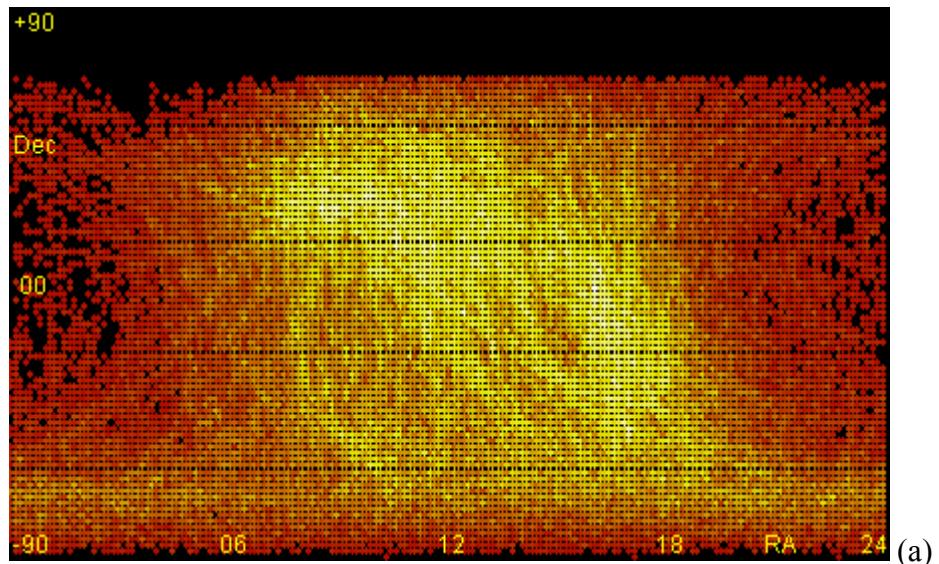
Aquele programa lê os arquivos de saída do SKiYMET e elimina os meteoros com ambigüidade. A partir da elevação, azimute e hora de ocorrência de um meteoro, o círculo máximo que contém os possíveis radiantes é desenhado em coordenadas equatoriais celestes. Isto é feito para todos os meteoros selecionados pelo radar.

Para traçar os círculos máximos, o programa divide a esfera celeste em regiões (“caixinhas”) com dimensões de  $2^\circ \times 2^\circ$  e permite selecionar o intervalo de tempo e altura dentro do qual desejamos realizar as contagens dos círculos máximos. Em geral, escolhemos um intervalo de altura de 40 km a partir de uma altura inicial de 70 km e um intervalo de tempo que cubra 24 horas do dia analisado.

Para cada meteoro detectado, o programa incrementa uma contagem em cada “caixinha”. Essa contagem corresponde a um possível radiante contido no círculo máximo que atravessa essas “caixinhas”. Assim, no caso de uma chuva de meteoros a “caixinha” com maior contagem corresponde à região onde está o radiante mais provável da chuva

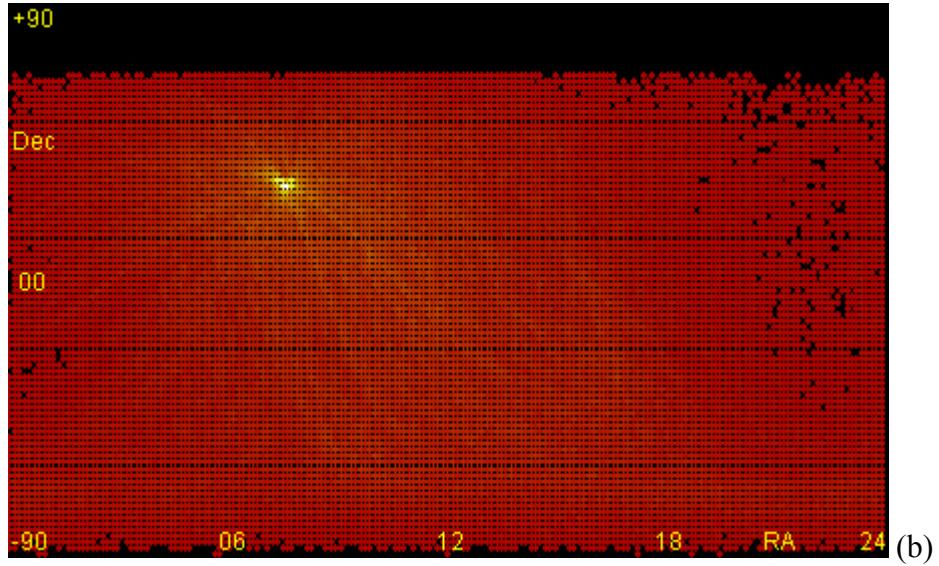
em questão. O programa sempre fornece a coordenada do centro da “caixinha” com a maior contagem. Logo, a posição do radiante é obtida automaticamente. Para dias de meteoros esporádicos a contagem máxima não é muito diferente da contagem média das “caixinhas” vizinhas, equivalendo a uma contagem de fundo em dias de chuva.

As figuras 5.5 (a) e (b) mostram exemplos deste procedimento, para um dia sem e outro com chuva de meteoros, respectivamente. Notamos por estas figuras que no dia de chuva, há uma região bem definida e concentrada de acordo com a escala de cores pré-definida no programa, indicando a posição do radiante. Portanto, na prática, identificamos um dia contendo algum radiante apenas observando estes gráficos.



**Fig. 5.5. Distribuição dos círculos máximos em função de coordenadas equatoriais celestes para um dia (a) sem radiante, (b) com radiante de chuva meteórica.**

**(continua).**



**Fig. 5.5. Conclusão.**

Para identificar as chuvas e estimar suas durações, fizemos uma pesquisa em todos os dias de um ano. Uma vez determinado o radiante, a data em questão marcava o início de uma chuva de meteoros. A partir deste instante, o máximo de contagem e a variação de sua posição em relação à coordenada do primeiro dia da chuva, foram monitorados sistematicamente. Enquanto os dias apresentavam a contagem máxima acima da contagem de fundo (esporádicos) e as coordenadas correspondentes a posição dessa contagem variassem dentro de  $+/-0,13$  h em ascensão reta e  $+/- 2^\circ$  em declinação, então o radiante foi considerado como sendo da mesma chuva. Através deste procedimento obtivemos o período das chuvas por nós identificadas. Os resultados desta análise são apresentados e discutidos no Capítulo 6.

### 5.2.2. Método de Separação de Meteoros

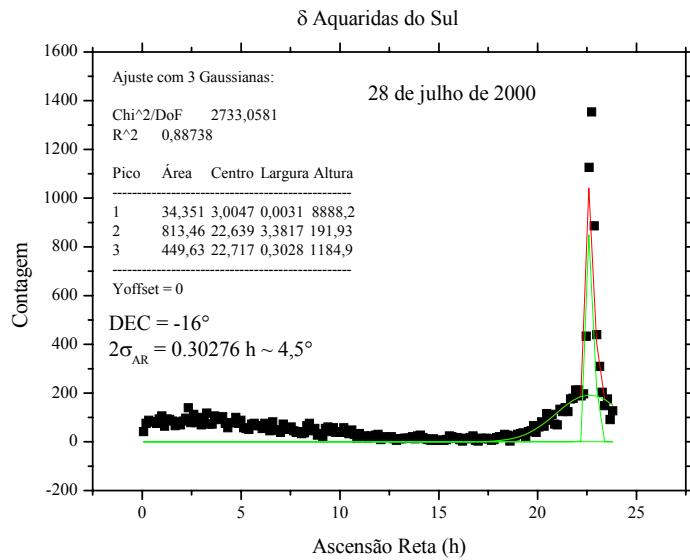
Nossa amostra de meteoros contém meteoros esporádicos em período de chuvas. Assim, foi necessária uma adaptação do programa RADIANTS a fim de excluirmos um bom percentual de esporádicos em dias de chuva de meteoros. Na nova versão, há a possibilidade de selecionarmos uma região em torno da posição do radiante da chuva. A di-

mensão desta região é escolhida com base na distribuição da contagem dos círculos máximos em função de ascensão reta e declinação.

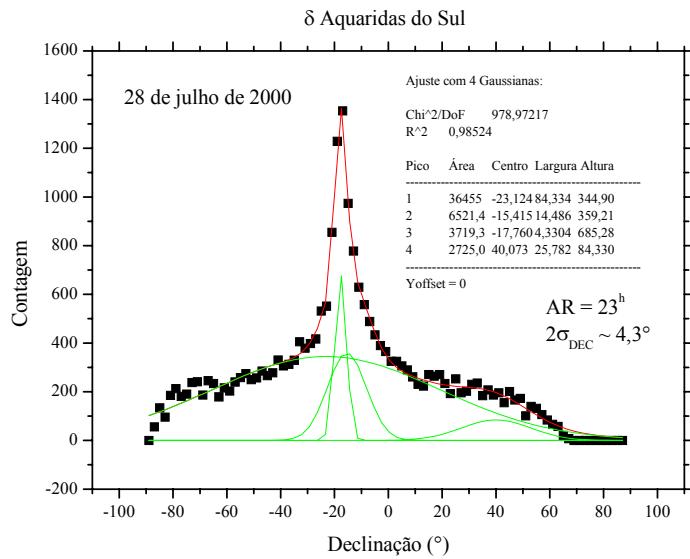
Ajustamos gaussianas às distribuições de contagens dos círculos máximos a fim de estimar suas dispersões ( $\sigma$ ), as quais correspondem à meia largura da gaussiana ajustada. Mostraremos apenas um exemplo do método analisado. As figuras 5.6 (a) e (b) representam as distribuições do número de contagem versus ascensão reta e declinação, respectivamente, para o ano 2000 no dia de máximo da DAS.

Em cada gráfico, a coordenada que não é função do gráfico permanece fixa com o valor da posição do máximo da distribuição. Em outras palavras, para cada valor de ascensão reta, as contagens correspondem ao número total de círculos máximos por ângulo sólido para uma declinação fixa (correspondente ao máximo daquela contagem); Enquanto que para cada valor de declinação, as contagens correspondem ao número total de círculos máximos por ângulo sólido para uma ascensão reta fixa (também correspondente ao máximo daquela contagem). A contagem por ângulo sólido visa compensar o mapeamento do sistema de coordenadas esféricas na representação cartesiana em duas dimensões.

A fim de evitarmos ao máximo a contaminação das chuvas de meteoros por esporádicos, assumimos que os meteoros das chuvas seriam aqueles que estivessem dentro de  $2\sigma$  em relação ao pico da distribuição de círculos máximos, tanto em ascensão reta quanto em declinação. Além disso, escolhemos o início e o final do tempo de contagem de acordo com o nascer e o ocaso do radiante da chuva. Utilizando estes critérios de seleção (radiante e tempo), foi possível criar arquivos contendo apenas os meteoros compatíveis com uma determinada chuva. Esses arquivos foram gerados para dias de máximos de cada chuva nos diferentes anos, os quais possuem o mesmo formato daquele fornecido pelo SKiYMET.



(a)



(b)

**Fig.5.6. (a) Distribuição da contagem dos círculos máximos para uma declinação fixa (correspondente à contagem máxima) ao longo de 24 horas, em função de ascensão reta. O ajuste gaussiano fornece uma largura de  $4,5^\circ$  ( $2\sigma_{\text{AR}}$ ); (b) Distribuição da contagem dos círculos máximos para uma ascensão reta fixa (correspondente à contagem máxima) ao longo de 24 horas, em função de declinação. O ajuste gaussiano fornece uma largura de  $4,3^\circ$  ( $2\sigma_{\text{DEC}}$ ).**

Contudo, sabemos que este método não elimina todos os esporádicos presentes no período da chuva. Assim, para termos uma idéia da quantidade de esporádicos que podem vir da mesma região do radiante da chuva, escolhemos um dia anterior e outro posterior ao período da chuva e aplicamos os mesmos critérios para o dia de máximo da chuva. Com isso, geramos arquivos contendo apenas os esporádicos que contaminam a amostra da chuva analisada.

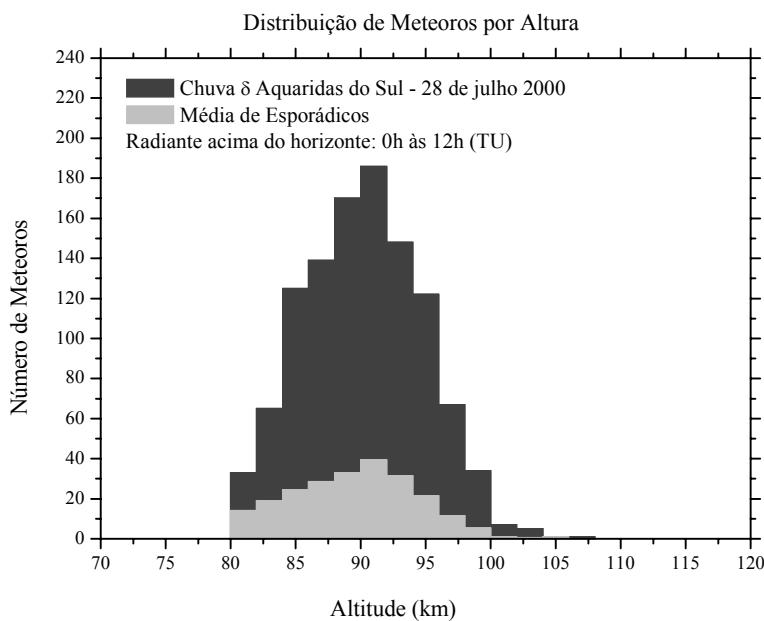
De posse desses arquivos, elaboramos histogramas com as taxas de ocorrência de meteoros em função da altura, hora, velocidade e tempo de duração das trilhas. Exemplo destes histogramas serão apresentados nas Seções seguintes.

### **5.2.3. Distribuição de Meteoros por Altura**

Os histogramas de ocorrência de meteoros em função da altura foram gerados a partir de arquivos criados pelo programa FLUXMET (desenvolvido pelo Dr. Paulo Prado Batista, INPE/ Divisão de Aeronomia). Este programa seleciona o fluxo de meteoros, sem ambigüidades, em intervalos de altura e hora. Os dados de entrada utilizados, neste programa, foram os arquivos gerados pelo método descrito na Seção anterior (método da separação de meteoros). A contagem de meteoros por altura (70-110 km) foi feita ao longo de um dia, em intervalos de 2 km.

Para obtermos a distribuição de meteoros por altura para as chuvas, escolhemos o dia de máxima atividade das mesmas. A fim de gerar este mesmo tipo de distribuição para os esporádicos provenientes da região dos radiantes das chuvas, utilizamos um dia anterior e outro posterior ao período destas chuvas para representar a distribuição média de esporádicos.

Na Figura 5.7, temos a distribuição de ocorrência de meteoros em função da altura ao longo do dia de máxima atividade (28 julho) para a chuva DAS em 2000, sobreposta a distribuição média dos esporádicos. Podemos perceber que há uma contagem maior de meteoros no dia de máximo da chuva em questão.



**Fig. 5.7. Distribuição média da ocorrência de esporádicos por altura sobrepostas à distribuição de ocorrência de meteoros no dia de máximo da chuva Delta Aquáridas do Sul em 2000. O número de meteoros corresponde à contagem feita no intervalo de tempo em que o radiante desta chuva estava acima do horizonte.**

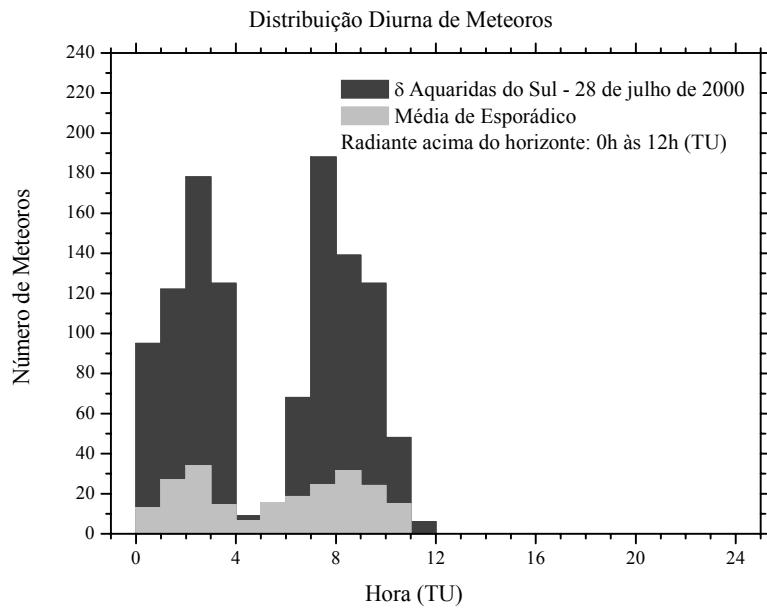
Com o objetivo de eliminarmos a contribuição dos esporádicos ainda presentes na distribuição das chuvas, subtraímos a distribuição feita a partir da média entre os esporádicos daquela correspondente à chuva. Procedimento equivalente foi aplicado nas outras chuvas analisadas. Os resultados são apresentados na Seção 6.2.1.

#### 5.2.4. Distribuição Diurna de Meteoros

A partir do FLUXMET, realizamos as contagens de meteoros em intervalos de uma hora dentro de 70 e 110 km de altura, a fim de analisarmos a distribuição de ocorrência de meteoros por hora ao longo do período das chuvas em 1999, 2000 e 2001. Lembra-mos que os arquivos de entrada para o cálculo das contagens também são aqueles gerados pelo método da separação de meteoros.

Analogamente à análise da distribuição de altura, escolhemos um dia anterior ao início e outro posterior ao final do período das chuvas a fim de gerarmos um perfil padrão para os meteoros esporádicos provenientes do radiante da chuva em questão. Utilizamos o dia de maior atividade da chuva para representarmos o perfil de chuva.

A Figura 5.8 mostra a distribuição diurna para os meteoros da chuva DAS em 2000, para o dia de máxima atividade da chuva. Esta distribuição está sobreposta à distribuição diurna média dos esporádicos. Notamos que a distribuição média de esporádicos apresenta uma contagem baixa quando comparada com aquela correspondente ao dia da chuva. Além desse fato, percebemos que estas distribuições, tanto chuva quanto esporádicos, apresentam dois máximos de contagens bem destacados que se encontram defasados aproximadamente de 6 horas.



**Fig. 5.8. Distribuição diurna para Delta Aquaridas do Sul sobrepostas à distribuição média de esporádicos associados com a região do radiante desta chuva, para o ano 2000. Estas distribuições foram geradas no intervalo de tempo equivalente ao período em que o radiante da chuva está acima do horizonte.**

Para eliminar a contaminação restante de esporádicos, realizamos a subtração entre as distribuições da chuva e esporádicos. Procedimento equivalente foi aplicado nas demais chuvas da amostra. Os resultados são apresentados na Seção 6.2.2.

A taxa horária média dos meteoros das chuvas, para o dia de máxima atividade, é obtida a partir da contagem total de meteoros ao longo do período em que seu radiante permanece acima do horizonte dividida pelo intervalo de horas equivalentes. Os valores das taxas horárias médias para todas as chuvas analisadas são mencionados no Capítulo 6.

### **5.2.5. Distribuição de Velocidades Geocêntricas**

A amostra de velocidades geocêntricas não é 100% representativa em relação ao número de meteoros detectados pelo radar. Isto ocorre porque o método para determinar este tipo de velocidade depende da intensidade do sinal recebido. Assim, quanto mais débil for o sinal, menor é a chance de se determinar a velocidade do meteoro.

Dessa forma, para elaborarmos os histogramas de velocidade com um peso estatístico razoável para os meteoros de uma dada chuva, somamos as velocidades medidas em seu dia de máxima atividade com aquelas de dois dias antes e depois a este. No caso de esporádicos provenientes da região do radiante da chuva em questão, os histogramas correspondem à soma de cinco dias no mesmo mês de ocorrência da chuva, nos quais o radiante não aparece. Os resultados são apresentados na Seção 6.2.3.

### **5.2.6. Distribuição do Tempo de Duração de Meteoros**

Geramos as distribuições do tempo de duração dos meteoros, no dia de máxima atividade de cada chuva, para os diferentes anos analisados. Como os perfis destas distribuições, para uma mesma chuva, são bastante semelhantes, realizamos a soma das referidas distribuições obtidas em cada ano, a fim de gerar um perfil da duração característica dos meteoros de uma dada chuva. Os resultados são apresentados na Seção 6.2.4.

### **5.3. Análise de Meteoros Esporádicos**

As mesmas propriedades estudadas para as chuvas foram também analisadas para os esporádicos. Os arquivos utilizados, neste caso, foram aqueles fornecido pelo SKiYMET, sem aplicar o método da separação de meteoros. Com o resultado da distribuição diurna dos esporádicos, verificamos ainda o comportamento sazonal dos mesmos.

#### **5.3.1. Distribuição de Esporádicos por Altura e por Hora**

A fim de gerarmos a distribuição média de esporádicos por altura para cada mês ao longo de um ano, obtivemos a média entre as contagens de meteoros por altura para dois dias fora do período de chuvas de meteoros. De forma análoga às distribuições de esporádicos por altura, geramos distribuições médias de meteoros por hora para cada mês em um dado ano. Os resultados destas distribuições são apresentados nas Seções 6.3.1. e 6.3.2, respectivamente.

#### **5.3.2. Variação Sazonal de Meteoros Esporádicos**

O comportamento diurno de meteoros esporádicos em um dado mês, para distintos anos, tende a ser sempre o mesmo, com pequenas flutuações que podem ser causadas por efeitos instrumentais. Todavia, dentro de um mesmo ano, este comportamento diurno varia significativamente de mês para mês (Hawkins, 1956). Para verificarmos este comportamento sazonal de meteoros esporádicos, escolhemos 10 dias de cada mês, em um dado ano, que não contivessem nenhuma chuva de meteoro, garantindo que apenas meteoros esporádicos fizessem parte de nossa amostra. A fim de obtermos uma taxa horária média de ocorrência representativa de cada mês, realizamos a média entre as contagens de 10 dias para um certo mês e a dividimos por 24 horas. O resultado desta variação sazonal é apresentado na Seção 6.3.3.

### **5.3.3. Distribuição de Velocidades Geocêntricas**

Histogramas mensais das distribuições de velocidades geocêntricas dos meteoros esporádicos foram feitos para os anos 2000 e 2001. Escolhemos seis dias de cada mês, fora de períodos de chuvas, a fim de obter tais histogramas com um maior peso estatístico. O resultado destes histogramas é apresentado na Seção 6.3.4.

### **5.3.4. Distribuição do Tempo de Duração dos Esporádicos**

Elaboramos histogramas mensais para distribuição do tempo de duração de meteoros esporádicos para os anos 1999, 2000 e 2001. Neste caso, escolhemos apenas um dia em cada mês, fora de períodos de chuvas, a fim de obter estes histogramas. O resultado destes histogramas é apresentado na Seção 6.3.5.

## **5.4. Rede GPS**

Medidas do Conteúdo Eletrônico Total (CET) da Ionosfera, obtidas durante o período das chuvas de meteoros de nossa amostra, foram gentilmente cedidas pelo Dr. Edvaldo Simões da Fonseca Júnior (Fonseca Júnior, 2002). Estas medidas foram feitas a partir de dados do Sistema Global de Posicionamento (GPS – *Global Positioning System*) que foram obtidos sistematicamente em Presidente Prudente, São Paulo, Brasil ( $22,1^{\circ}$  S e  $51,4^{\circ}$  W).

O GPS consiste em uma rede de 24 satélites que preenchem seis planos orbitais distintos, cada qual com  $55^{\circ}$  de inclinação em relação ao equador terrestre e período orbital de aproximadamente 12 horas. Estes satélites têm órbitas quase circulares com aproximadamente 20.000 km de altitude acima da superfície da Terra e geram sinais em duas bandas de freqüência específicas ( $f_1=1575,42$  MHz e  $f_2=1227,60$  MHz). Além disso, cada satélite é equipado com painéis solares para suprimento de potência e rodas de

reação (*reaction wheels*) para controle de atitude, bem como um sistema de propulsão para ajuste da órbita.

Os receptores de GPS são similares aos receptores de um radiotelescópio: contêm uma antena, pré-amplificadores, sessão de rádio freqüências, unidade de armazenamento de dados, controle, etc.

O impacto do estado da ionosfera na propagação das ondas de rádio é caracterizado pelo Conteúdo Elétrons Total, dado por:

$$I = \int n_e(s)ds \quad (5.1)$$

Sendo  $n_e$  a densidade volumétrica de elétrons.

A Equação (5.1) contém o número total de elétrons livres que estão contidos em uma coluna cilíndrica com seção transversal de  $1 \text{ m}^2$  que se estende ao longo do caminho  $s$ , entre o satélite e o receptor  $R$ . A unidade de medida desta quantidade é o UCET (Unidade do Conteúdo Total de Elétrons – 1 UCET =  $10^{16}$  elétrons/ $\text{m}^2$ ).

O conteúdo eletrônico na vertical  $I_v$  é expresso da seguinte forma:

$$I_v = IF \quad (5.2)$$

Sendo,

$F = \left[ (1 - r_e^2 \operatorname{sen}^2(E_{hi})) / (r_e + h_m) \right]^{1/2}$  – função de mapeamento calculada para cada distância zenital;

$E_{hi}$  – ângulo de elevação entre a trajetória percorrida pelo sinal e o plano do horizonte na altura média  $h_i$ ;

$h_m$  – altura média da ionosfera;

$r_e$  – raio da Terra.

A ionosfera, em ondas de rádio, é um meio dispersivo (ver Seção 4.3). Logo, a refração ionosférica depende da freqüência do sinal considerado. Desprezando termos de segunda ordem, podemos escrever o coeficiente de refração ionosférica  $N_i$  para medidas da fase de uma onda portadora como:

$$N_i = 1 - \frac{\gamma n_e}{f^2} \quad (5.3)$$

Sendo,

$\gamma$  – constante;

$n_e$  – densidade de conteúdo eletrônico ao longo da trajetória de propagação do sinal;

$f$  – freqüência da onda portadora.

Integrando a Equação (5.3) ao longo da trajetória de propagação  $s$ , e levando-se em consideração a Equação (5.1), obtemos a variação de fase do sinal transmitido  $\Delta\rho_i$ , que é uma consequência do efeito da refração ionosférica:

$$\Delta\rho_i = \int (N_i - 1) ds = -\gamma \frac{I}{f^2} \quad (5.4)$$

Com  $\gamma = 4,03 \times 10^{17} \text{ ms}^{-1} \text{ UCET}^{-1}$ .

Pela Equação (5.4), notamos que a variação de fase é inversamente proporcional ao quadrado da freqüência. Uma combinação linear dos sinais ( $\Delta\rho_{12} = \Delta\rho_1 - \Delta\rho_2$ ), denominada **combinação livre da geometria**, elimina os efeitos sistemáticos de propagação, permitindo que seja obtido o atraso de fase introduzido nas ondas portadoras devido apenas ao meio ionosférico.

$$\Delta\rho_{12} = -\gamma \left( \frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) I(\theta, l) F(z) + B \quad (5.5)$$

Sendo,

$\Delta\rho_{12}$  – variação de fase observada independente da geometria;

$f_1$  e  $f_2$  – freqüências associadas com as ondas portadoras;

$I(\theta, l)$  – CET vertical como função da latitude  $\theta$  e da longitude solar  $l$ ;

$F(z)$  – função de mapeamento em termos da distância zenital  $z$ ;

$B$  – constante de ambigüidade na fase dos sinais dos satélites.

Esta combinação linear é a grandeza básica fornecida pelo programa científico BERNSE (Rothacher & Mervart, 1996), a partir da qual os valores de CET são calculados. O  $I(\theta, l)$  utilizado na Equação (5.5) é aquele obtido com o modelo local de CET, representado por:

$$I(\theta, l) = \sum_0^{n_{\max}} \sum_0^{m_{\max}} I_{nm} (\theta - \theta_0)^n (l - l_0)^m \quad (5.6)$$

Sendo,

$m_{\max}$  e  $n_{\max}$  – graus máximos da expansão em séries de Taylor bi-dimensional em latitude  $\theta$  e longitude solar  $l$ ;

$I_{nm}$  – coeficientes de CET (desconhecidos) da série de Taylor que são os **parâmetros do modelo local de ionosfera** a serem estimados.

O BERNSE foi desenvolvido na Universidade de Berna, Suiça, para o processamento de dados GPS e dados do sistema de navegação por satélites russo (GLONASS – *Global Navigation Satellite System*), com alto grau de precisão. Dentre suas diversas aplicações está a modelagem da ionosfera e troposfera. Apesar de sua importância este programa é complexo e difícil de ser aplicado. Por esse motivo uma nova rotina computacional foi desenvolvida por Fonseca Júnior (2002) a fim de otimizar a utilização do programa BERNSE. O procedimento para obtenção dos dados é o seguinte:

- Análise da integridade dos arquivos diários (24 horas) de cada estação;
- Divisão do arquivo diário em 12 arquivos de 2 horas;
- Conversão de formato dos arquivo;
- Processamento dos arquivos para o cálculo do CET em intervalos de 2 horas.

Maiores detalhes sobre o programa e a metodologia empregada para obtenção das medidas de CET são discutidos em Fonseca Júnior (2002).

### **5.5. Análise de Efeitos no Conteúdo Eletrônico Total (CET) da Ionosfera**

Criamos gráficos diários de CET sobrepostos a valores mensais médios desta quantidade em períodos de chuvas da amostra para os anos de 1999 e 2000, tendo como objetivo verificar se há algum aumento significativo nas medidas de CET diárias em relação ao comportamento mensal médio desta grandeza durante horários noturnos. Não há dados de CET para 2001, devido à alta atividade solar ocorrida neste ano. O resultado da análise destes gráficos é apresentado na Seção 6.3.



## CAPÍTULO 6

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta Seção, apresentamos e discutimos os resultados obtidos a partir da análise feita tanto para as três chuvas de meteoros quanto para os meteoros esporádicos, bem como para o conteúdo eletrônico total ionosférico. Os principais parâmetros derivados de nossa análise relativos aos meteoros estão listados nas tabelas contidas nas Seções seguintes.

#### 6.1. Seleção das Chuvas de Meteoros

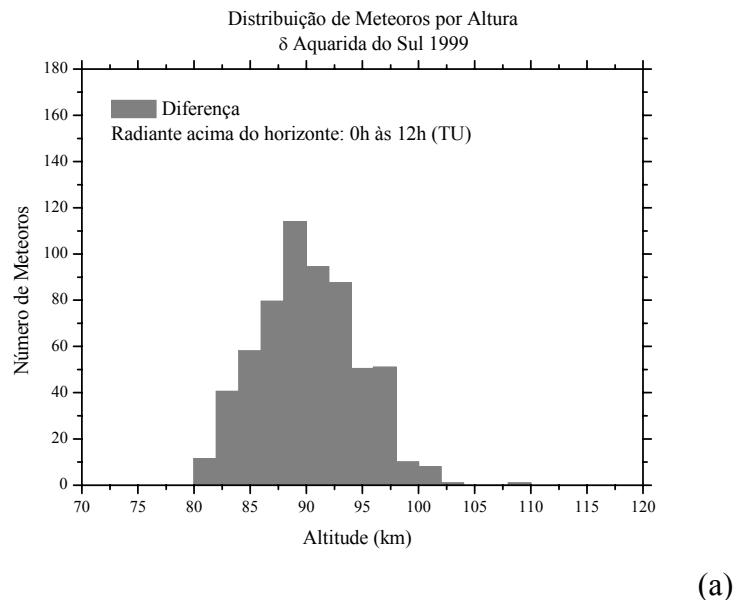
A partir de uma pesquisa de radiantes realizadas em todos os dias de cada ano analisado, geramos uma lista contendo o período em que os radiantes se destacavam em relação aos esporádicos. A partir destes resultados identificamos as respectivas chuvas associadas. Nossa amostra inicial continha as chuvas Quadrantidas, Eta Aquaridas, Ariétidas, Delta Aquaridas do Sul, Orionidas, Leonidas e Geminidas. Estas chuvas cobrem praticamente todos os meses de um ano. O objetivo inicial era estudar as propriedades de todas estas chuvas. Contudo, devido a nossa grande massa de dados acumulada em um período de três anos, não foi possível analisarmos detalhadamente todas estas chuvas.

Por este motivo, escolhemos apenas três chuvas com características distintas (como por exemplo, uma chuva com curta duração e alta velocidade enquanto as demais apresentassem longa duração e velocidades baixas). Selecioneamos, assim, duas chuvas de meteoros bastante estudadas na literatura (Leonidas e Geminidas) a fim de assegurarmos que o método de análise adotado neste trabalho é consistente, e uma outra que não fosse tão explorada e apresentasse alguma peculiaridade (Delta Aquaridas do Sul).

## 6.2. Resultados para as Chuvas de Meteoros

### 6.2.1. Distribuição de Meteoros por Altura

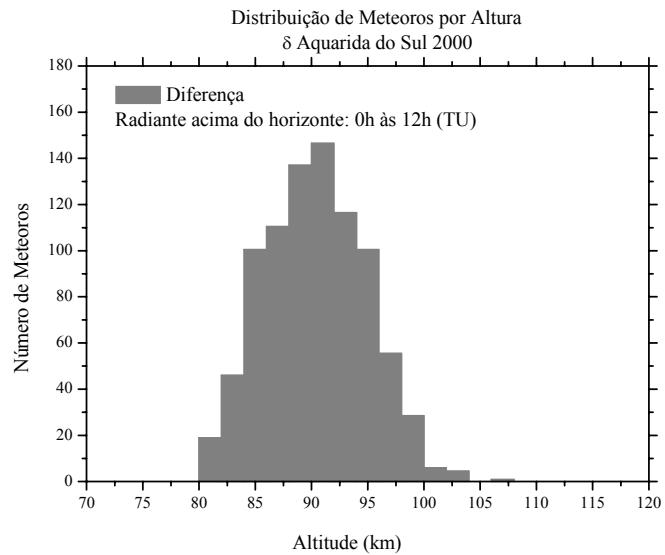
As Figuras 6.1 (a), (b) e (c) mostram as distribuições dos meteoros associados com a chuva DAS (aquaídeos) em função da altura. Estes gráficos resultam do critério descrito na Seção 5.2.3. A partir destas figuras, notamos que o pico dos aquaídeos ocorre entre de 85 e 93 km de altitude.



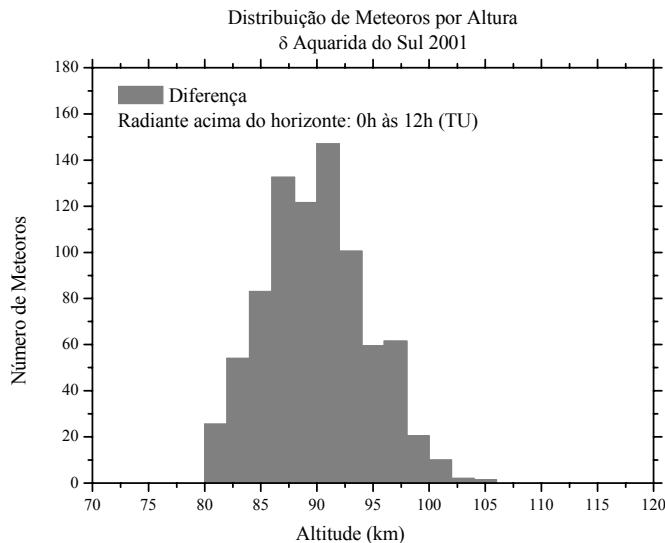
(a)

**Fig. 6.1. Distribuições finais da ocorrência de meteoros por altura para chuva Delta Aquaridas do Sul em (a) 1999, (b) 2000 e (c) 2001. Estas distribuições são consequência da subtração da contribuição de esporádicos provenientes da região do radiante desta chuva.**

**(continua).**



(b)



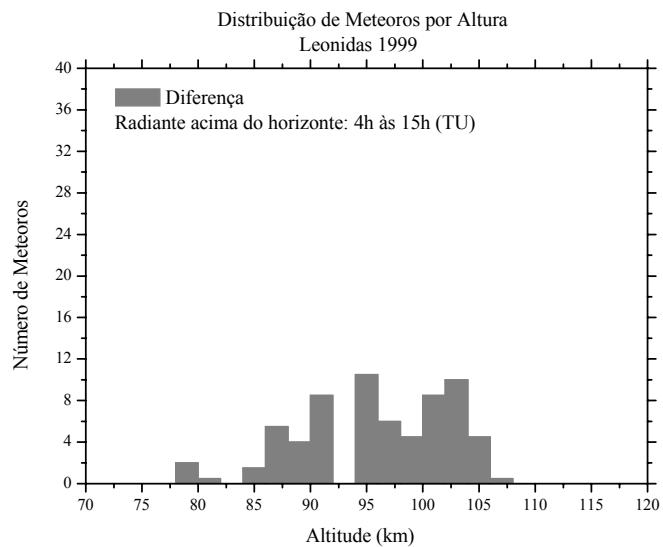
(c)

**Fig. 6.1. Conclusão.**

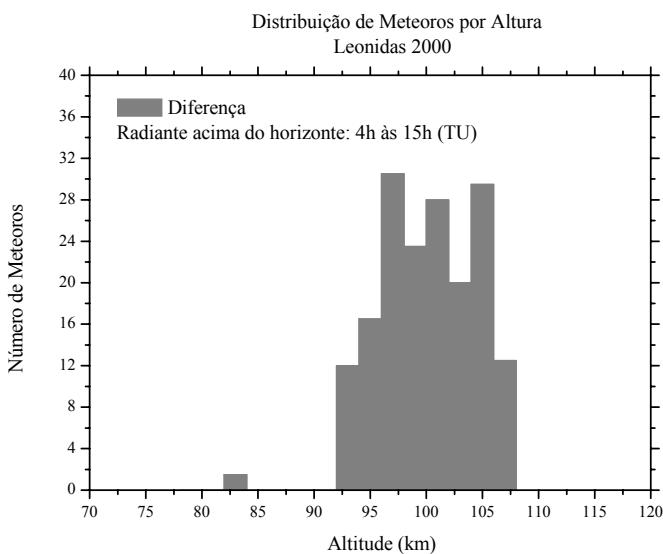
As Figuras 6.2 (a), (b), (c) e 6.3 (a), (b), (c) são os histogramas finais em função da altura para os meteoros associados com a chuva Leonidas (leonídeos) e a chuva Geminidas (geminídeos), respectivamente. Para Leonidas, verificamos um excesso de meteoros acima de 95 km de altura que possivelmente estão associados a esta chuva. Os dados observados abaixo desta altura devem ser meteoros esporádicos. A baixa contagem dos

leonídeos observada por altura em 1999, pode ser justificada por este ano corresponder à etapa inicial de funcionamento do radar, aliada ao fato desta chuva não contribuir com muitos meteoros para observadores situados em nossa latitude. Entretanto, os anos 2000 e 2001 apresentam uma maior contagem em altitudes acima de 95 km. Esse resultado é compatível com o aumento previsto no fluxo de partículas dessa chuva em um ciclo aproximado de 33 anos. O último ano que Leonidas apresentou um máximo nas suas contagens de meteoróides foi em 1966. O excesso na taxa de ocorrência de meteoros além de 95 km mostra que essa chuva possui meteoróides com altas velocidades, pois quanto maior a velocidade de entrada do meteoróide na atmosfera, mais alta a região em que o processo de ablação se inicia (McKinley, 1961; Hughes, 1978).

Pelos histogramas de Geminidas, o pico de sua distribuição ocorre entre de 86 e 96 km de altitude. Este resultado é similar àquele encontrado para Geminidas a partir de dados obtidos em Jodrell Bank (Browne et al., 1956), que sugerem um máximo em torno de 90 e 100 km de altura. O perfil de distribuição de altura de Geminidas é bastante similar ao da DAS. Contudo, o intervalo da altura de ablação dos geminídeos é maior se comparado com o dos aquarídeos. Isto, possivelmente, deve-se ao fato das partículas de Geminidas terem maiores dimensões, já que a velocidade típica dos geminídeos é menor que a velocidade atribuída aos aquarídeos (ver Apêndice 5).



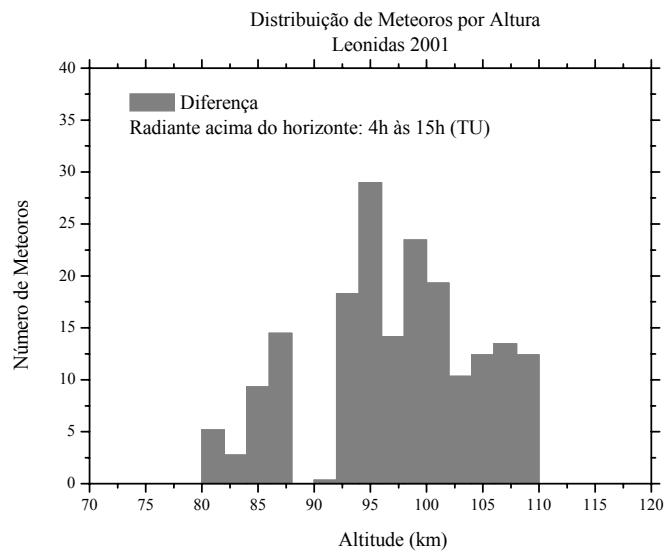
(a)



(b)

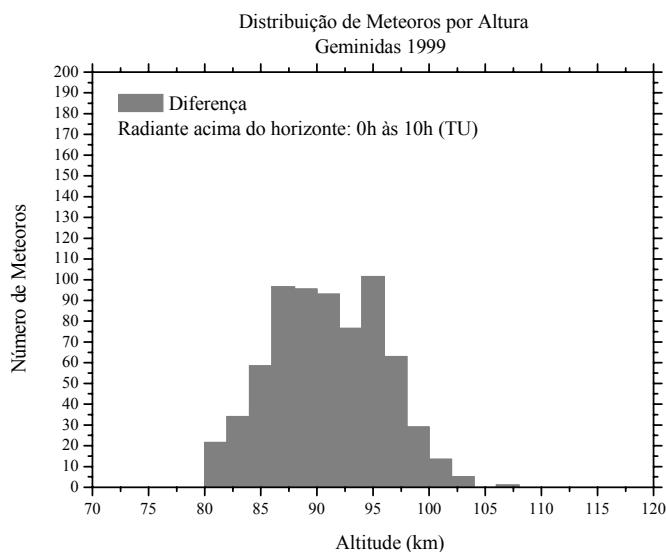
**Fig. 6.2. Distribuições da ocorrência de meteoros por altura para Leonidas em (a) 1999, (b) 2000 e (c) 2001.**

**(continua).**



(c)

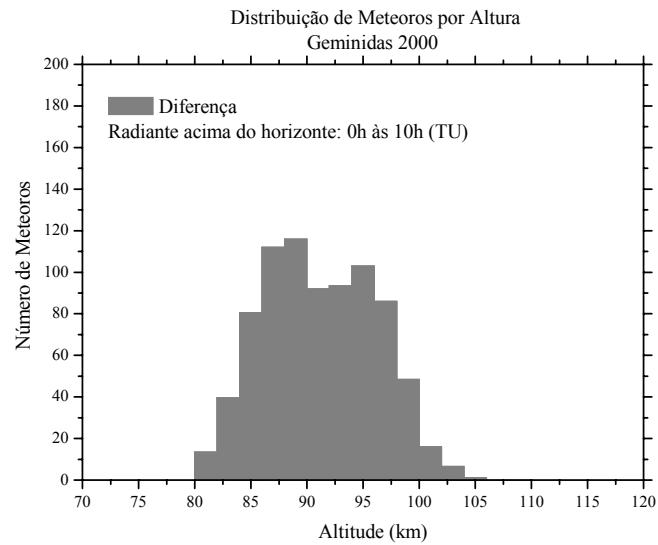
**Fig. 6.2. Conclusão.**



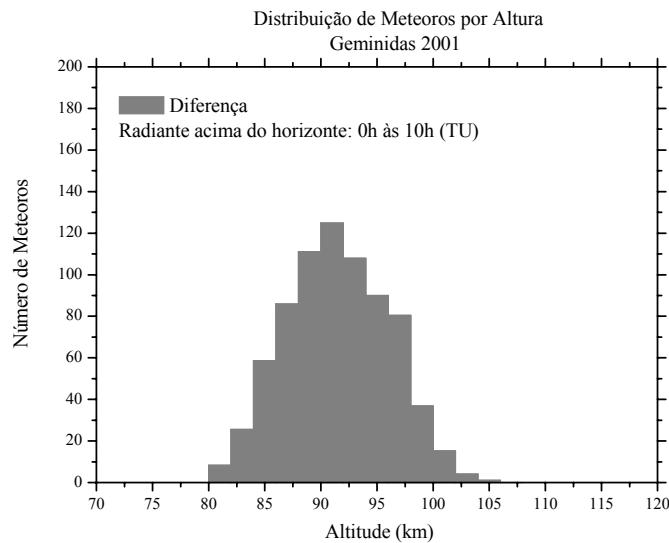
(a)

**Fig.6.3. Distribuições da ocorrência de meteoros por altura para Geminidas em (a) 1999, (b) 2000 e (c) 2001.**

**(continua).**



(b)



(c)

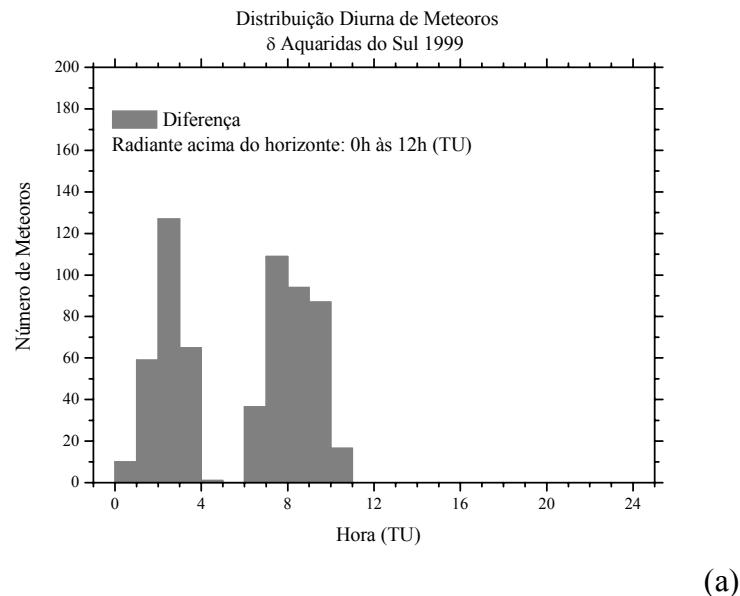
**Fig.6.3. Conclusão.**

Em 2001, as contagens de Leonidas e Geminidas apresentavam um aumento sistemático nas contagens em consequência da duplicação da potência de transmissão do radar no início de novembro do referido ano. Neste caso, foi então aplicado um fator de correção de 1,45 obtido a partir da diferença dos máximos de contagens em relação aos anos an-

teriores. O valor encontrado para este fator é compatível com estimativas teóricas que, para este caso, equivale aproximadamente à raiz quadrada de dois (McKinley, 1961).

### 6.2.2. Distribuição Diurna de Meteoros

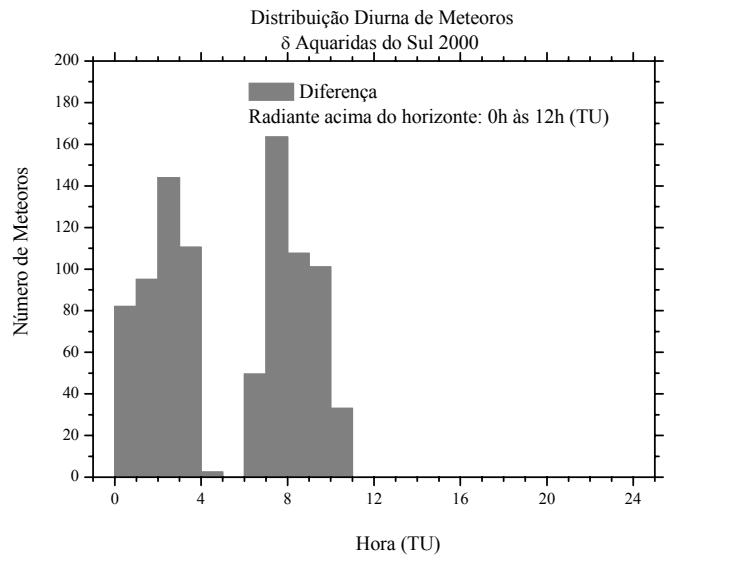
As Figuras 6.4 (a), (b) e (c) apresentam as distribuições finais para os aquarídeos em função da hora decorrentes dos critérios apresentados na Seção 5.2.4. Notamos que para os três anos, há um máximo de contagem às 2,5h e 7,5h (TU).



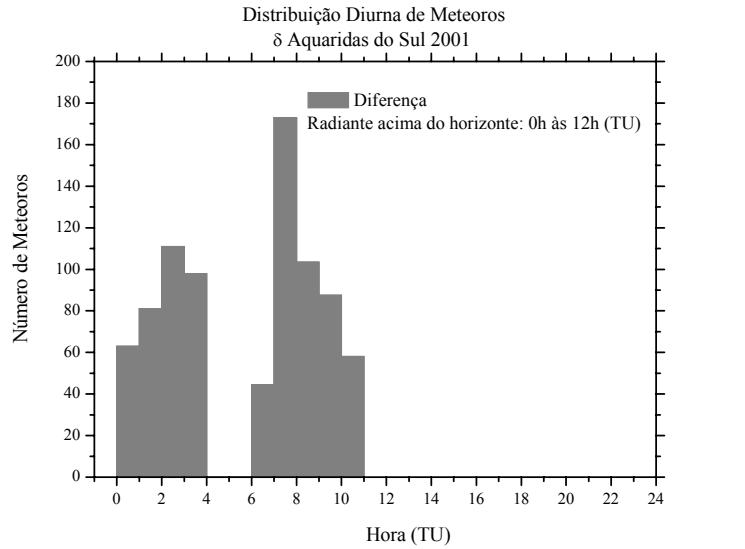
(a)

**Fig. 6.4. Distribuições diurnas da ocorrência de meteoros para chuva Delta Aquarídeas do Sul em (a) 1999, (b) 2000 e (c) 2001.**

(continua).



(b)

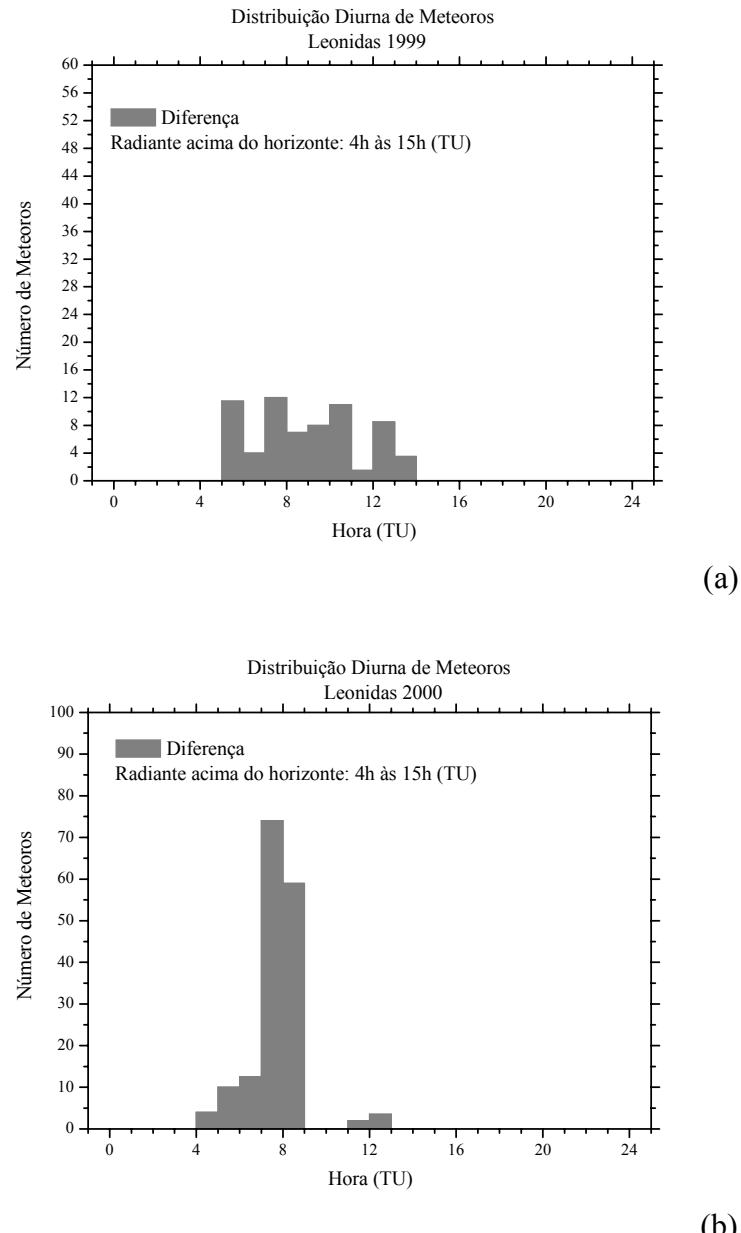


(c)

**Fig. 6.4. Conclusão.**

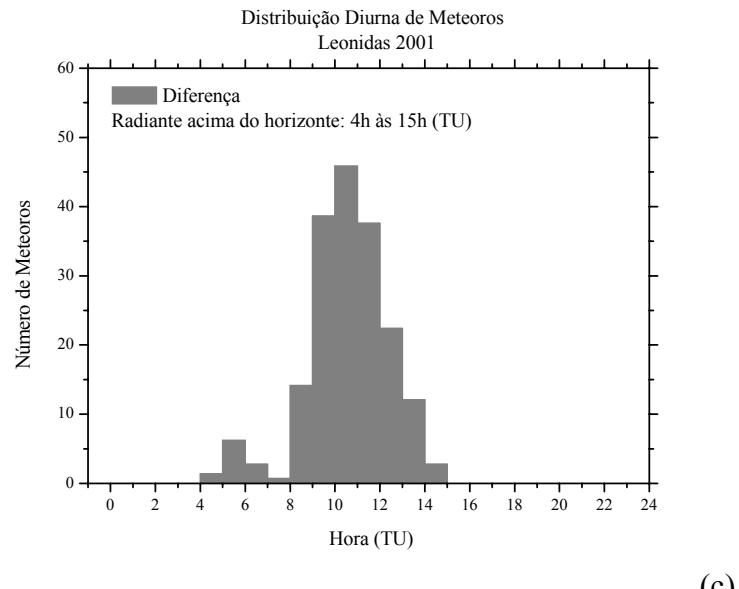
Histogramas análogos foram realizados para Leonidas (Figuras 6.5) e Geminidas (Figuras 6.6). Pelas Figuras 6.5 (a), (b) e (c), observamos que os leonídeos têm maior contribuição entre 7h e 9h (TU) em 2000 e entre 9h e 12h (TU) em 2001. Em 1999, além da baixa contagem, os dados não destacam nenhum pico de ocorrência para Leonidas. As Figuras 6.6 (a), (b) e (c) mostram que Geminidas tem uma contribuição forte e quase

homogênea entre 3h e 7 h (TU) em 1999; entre 2h e 8h (TU) em 2000; e entre 4h e 8h (TU) em 2001. Este resultado corrobora o fato de Geminidas ser uma chuva bastante regular, pois o intervalo de contribuição máxima da chuva é quase o mesmo para os diferentes anos estudados.

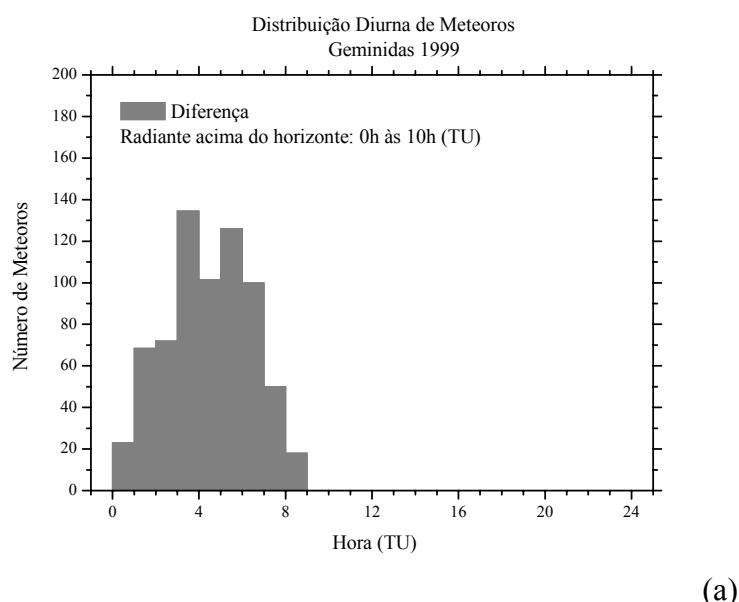


**Fig. 6.5. Distribuições diurnas da ocorrência de meteoros para chuva Leonidas em (a) 1999, (b) 2000 e (c) 2001.**

**(continua).**

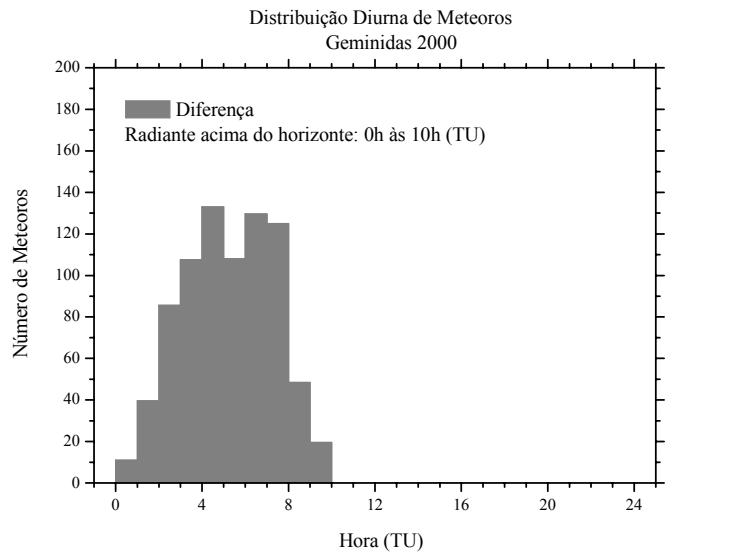


**Fig. 6.5. Conclusão.**

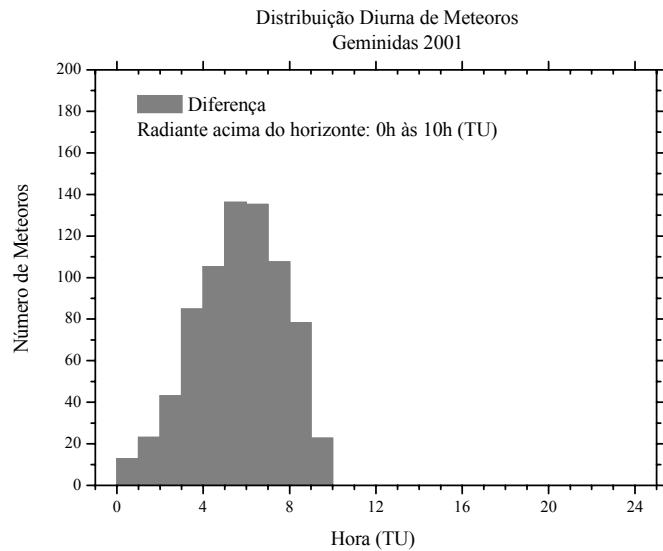


**Fig. 6.6. Distribuições diurnas da ocorrência de meteoros para chuva Geminidas em (a) 1999, (b) 2000 e (c) 2001.**

**(continua).**



(b)

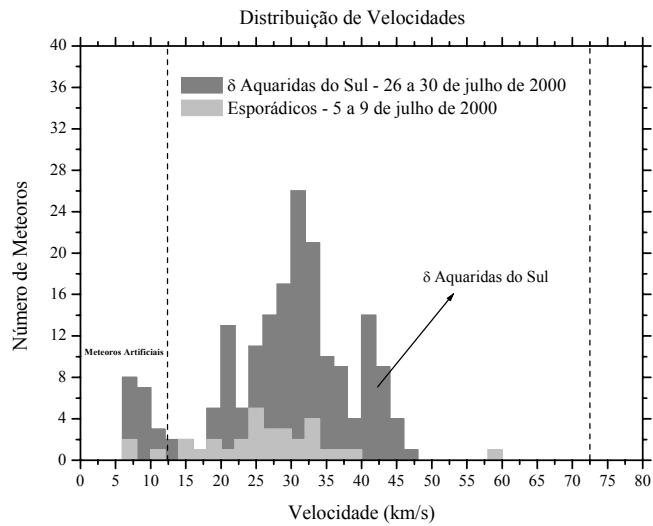


(c)

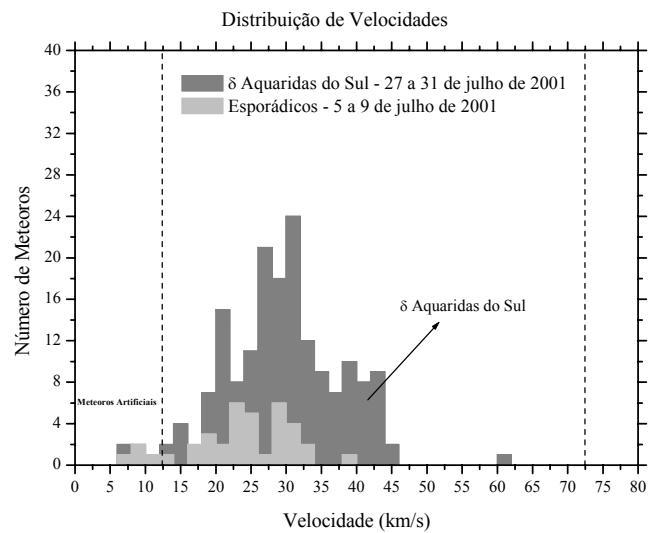
**Fig. 6.6. Conclusão.**

### 6.2.3. Distribuição de Velocidades Geocêntricas

As Figuras 6.7 (a) e (b) são os histogramas de velocidade para os aquarídeos, sobrepostos aos de esporádicos para os anos 2000 e 2001, seguindo os critérios da Seção 5.2.5. Não há dados de velocidade de meteoros para 1999 durante nenhum período.



(a)



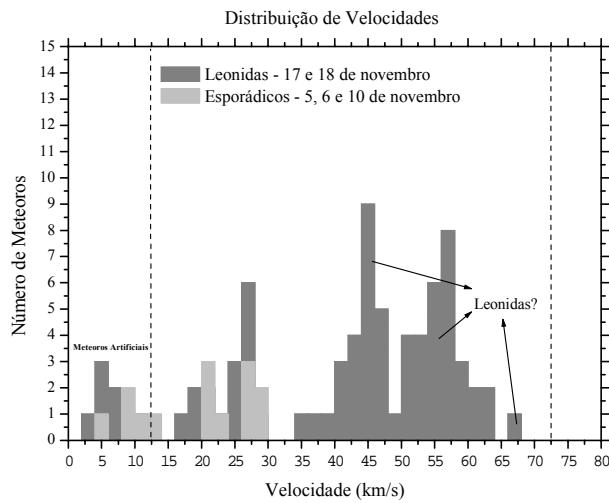
(b)

**Fig. 6.7. Histogramas de velocidade padrão de esporádicos sobreposto aos histogramas da chuva Delta Aquaridas do Sul em (a) 2000 e (b) 2001.**

Nestes gráficos, notamos que não há praticamente contagem de esporádicos acima de 40 km/s e que há um excesso significativo de contagem acima deste valor no histograma da chuva. Desta forma, a Figura mostra que há um indício dos meteoros dessa chuva terem velocidades acima de 40 km/s. Isto é compatível com resultados de outros trabalhos (Ceplecha et al., 1998), os quais sugerem uma velocidade típica de 41 km/s.

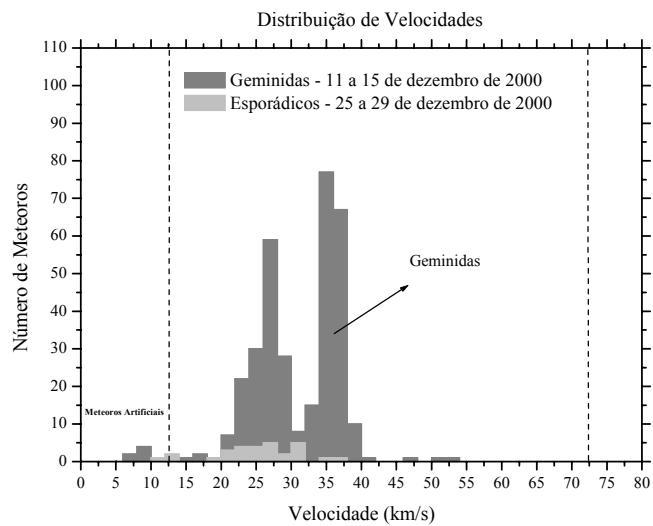
Para a chuva Leonidas, pelo fato de sua contagem ser baixa e por seu período de duração ser curto (em torno de um dia), fomos obrigados a utilizar um método diferente. Para gerar o histograma de velocidades desta chuva, somamos os dados dos dias em que esta ocorreu nos diferentes anos. Em 2000, Leonidas ocorreu em 17 e 18 de novembro, enquanto que em 2001 só ocorreu no dia 18 de novembro. Assim, os histogramas dos esporádicos foram feitos a partir da soma dos dados de velocidades para 2 dias selecionados em 2000 com dados para um dia em 2001, todos no mês de novembro.

Na Figura 6.8, notamos que há um excesso de contagem no histograma da chuva em relação ao histograma de esporádicos acima de 35 km/s com picos de distribuição em 45 km/s e 57 km/s. Observamos apenas um meteoro com valor de velocidade em torno de 67 km/s, o que sugere que os meteoros desta chuva têm altas velocidades.

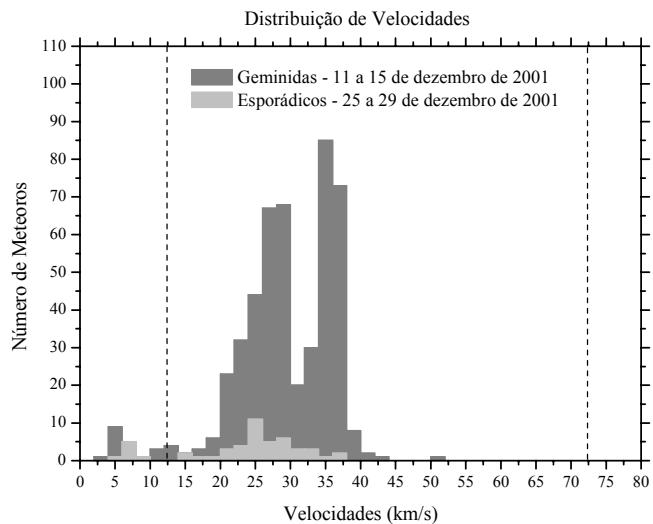


**Fig. 6.8. Histograma de velocidade de esporádicos sobreposto ao histograma da chuva Leonidas para os anos 2000 e 2001 somados.**

Os histogramas de esporádicos foram sobrepostos àqueles da chuva Geminidas, segundo o mesmo critério aplicado para DAS. As Figuras 6.9 (a) e (b), mostram que há um excesso de contagem entre 32,5 e 37,5 km/s no histograma de chuva em relação ao de esporádicos. O valor médio de velocidade dos geminídeos é obtido deste intervalo, cujo valor de 35 km/s é idêntico aquele publicado por Ceplecha et al. (1998).



(a)



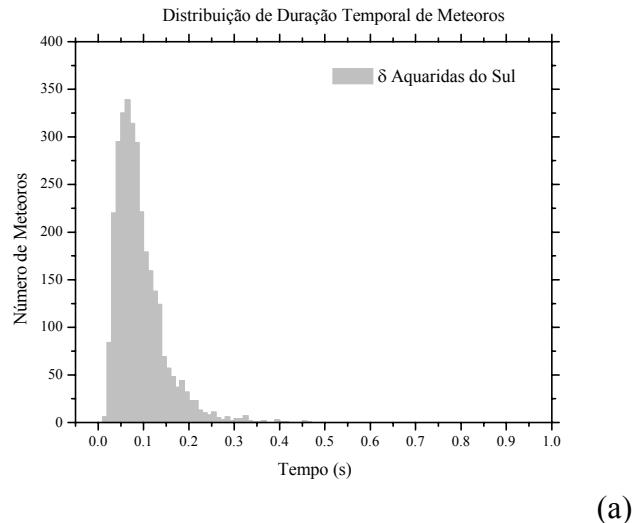
(b)

**Fig. 6.9. Histogramas de velocidade padrão de esporádicos sobreposto aos histogramas da chuva Geminidas em (a) 2000 e (b) 2001.**

Contudo, os histogramas associados às três chuvas também apresentam picos de velocidades em torno de 25 km/s e 30 km/s que podem estar associados com a velocidade típica de meteoros esporádicos. Além disso, podemos atribuir as velocidades abaixo de 12,0 km/s aos meteoros artificiais gerados por detritos espaciais, pois estão abaixo da velocidade mínima associada aos meteoróides, conforme mencionado na Seção 2.1.

#### 6.2.4. Distribuição do Tempo de Duração de Meteoros

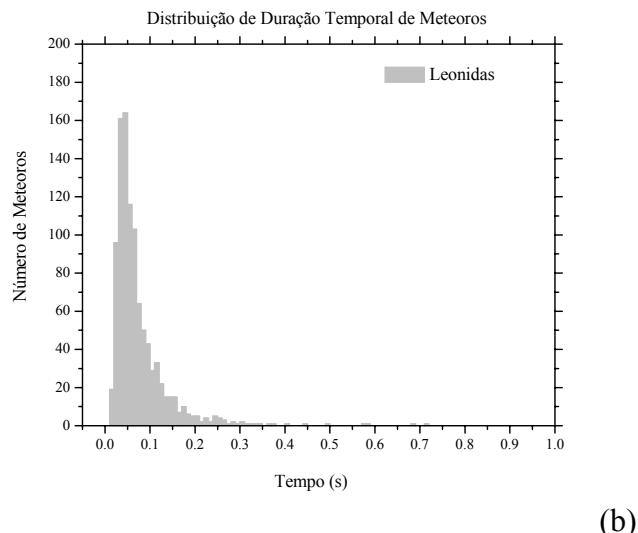
As Figuras 6.10 (a), (b) e (c) representam as distribuições do tempo de duração dos aquarídeos, leonídeos e geminídeos pelo critério adotado na Seção 5.2.6. Os perfis das distribuições confirmam que os meteoros das chuvas analisadas são subdensos. Além disso, observamos que o pico das distribuições ocorre em torno de 0,05 s. A duração das trilhas de meteoros estimada pelo SKiMET é definida como a medida do tempo que a amplitude do eco leva para chegar a um valor de  $1/2$  da sua amplitude máxima. Assim, para conhecermos a diferença real entre o valor fornecido por estas distribuições daquele previsto pela teoria clássica de 0,1 s (conforme mencionado na Seção 4.4), temos que multiplicar o valor encontrado (0,05 s) por um fator inverso ao  $\ln(2) \sim 0,69$ . Neste caso, o valor típico de duração das trilhas passa a ser aproximadamente de 0,07 s. Portanto, o valor de tempo de duração dos meteoros observado difere apenas cerca de 30% do teórico.



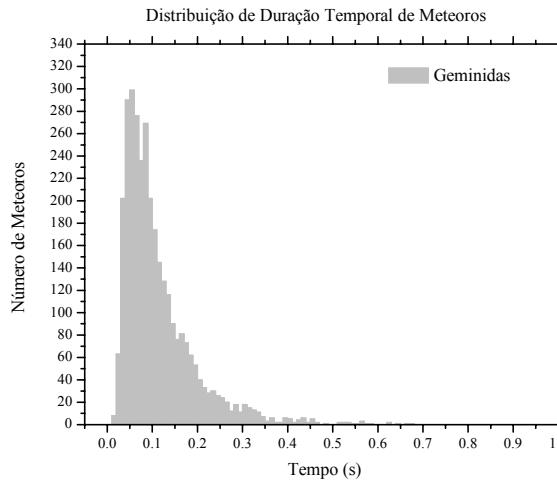
(a)

**Fig. 6.10. Distribuições do tempo de duração de meteoros contendo a soma de dados dos dias de máxima atividade das chuvas de meteoros em 1999, 2000 e 2001. (a) Delta aquaridas do Sul, (b) Leonidas e (c) Geminidas.**

**(continua).**



(b)



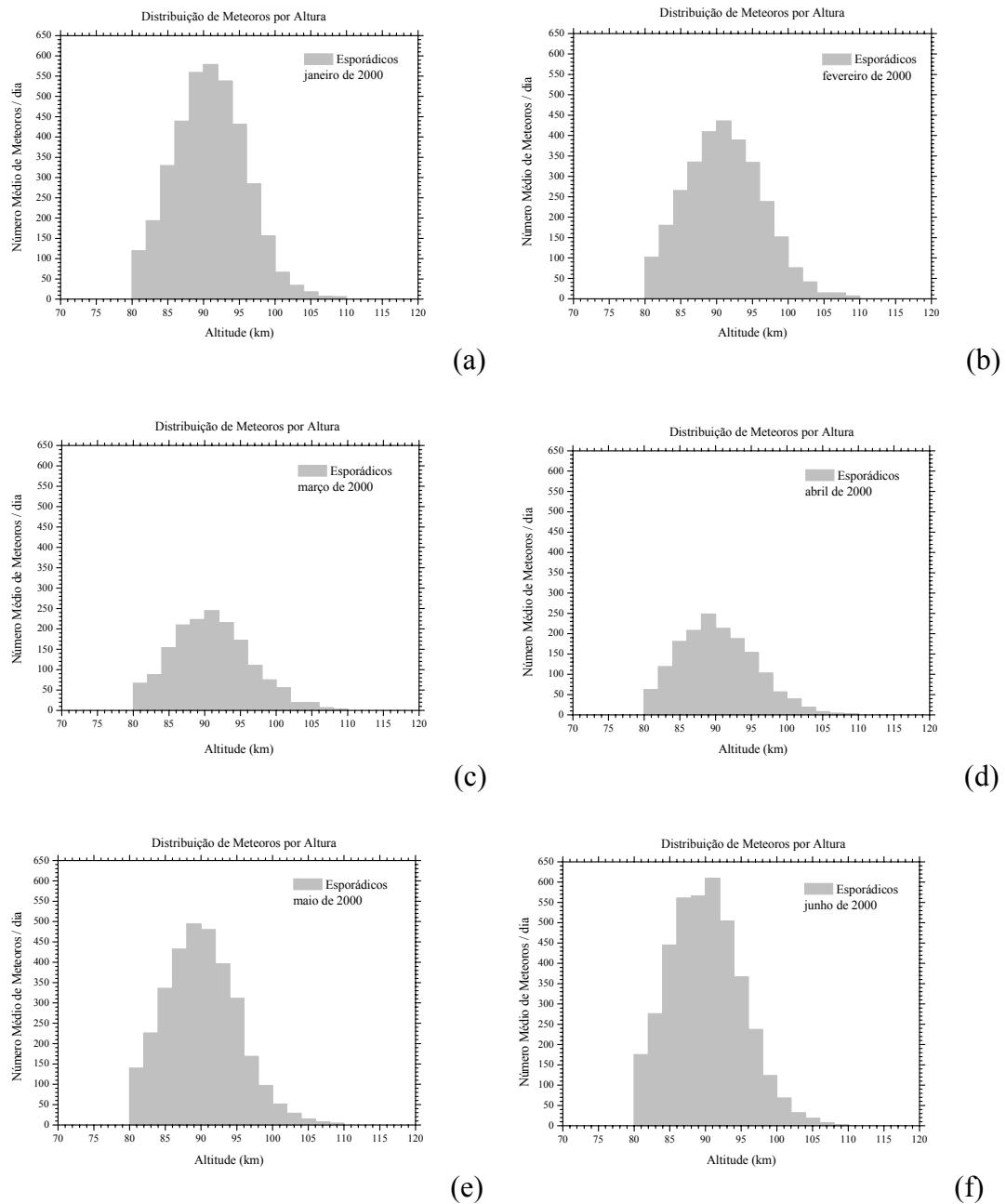
(c)

**Fig. 6.10. Conclusão.**

### 6.3. Resultados para Meteoros Esporádicos

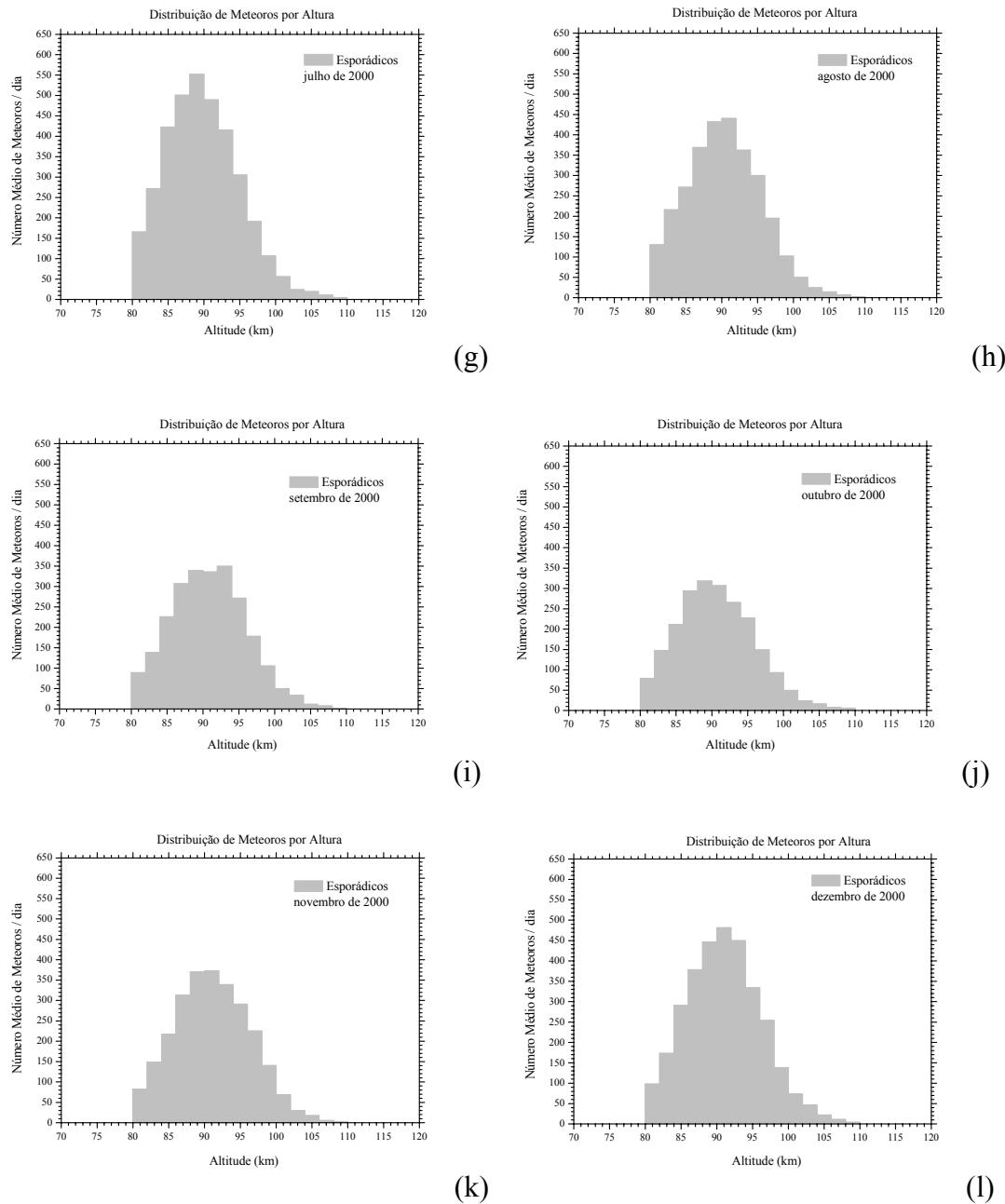
#### 6.3.1. Distribuição de Esporádicos por Altura

As Figuras 6.11 de (a) a (l) apresentam as distribuições de esporádicos em função da altura para o ano 2000 (histogramas semelhantes foram feitos para os demais anos). Estas distribuições são resultados da análise descrita na Seção 5.3.1.



**Fig.6.11. Distribuições médias do número de meteoros diárias em função da altura para cada mês do ano 2000.**

**(continua).**

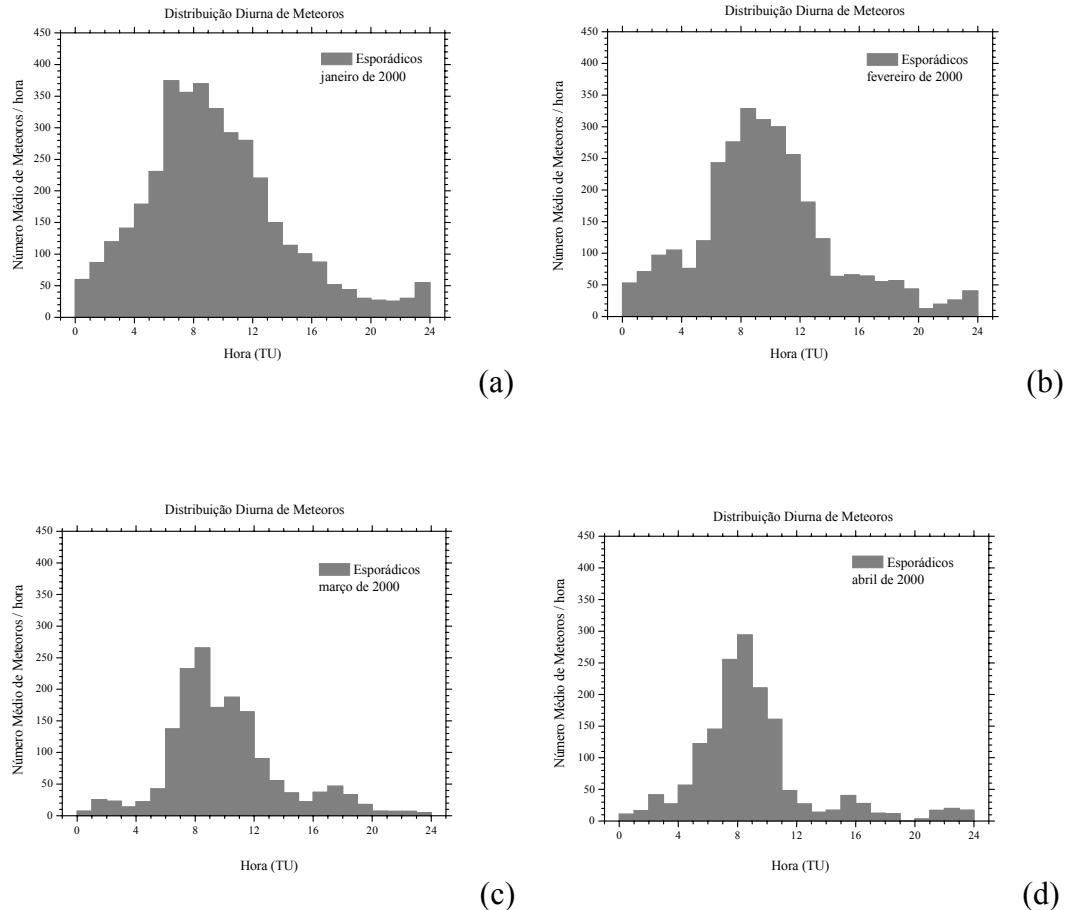


**Fig.6.11. Conclusão.**

Por estas distribuições médias, notamos que os meteoros esporádicos tendem a se formar, em grande maioria, em torno de 90 km de altura. Além disso, o número total de ocorrência por altura varia de mês para mês, o que indica um comportamento diferente dos esporádicos de acordo com a época do ano (ver Seção 6.3.3).

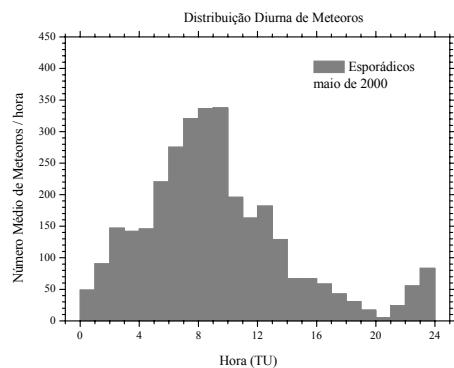
### 6.3.2. Distribuição Diurna de Esporádicos

As Figuras 6.12 de (a) a (l) representam as distribuições diurnas de esporádicos para o ano 2000, lembrando que distribuições análogas foram feitas para os demais anos cujos perfis de distribuição diurna são muito semelhantes em relação aos que estão sendo apresentados aqui. Estas distribuições seguem o critério apresentado na Seção 5.3.1.

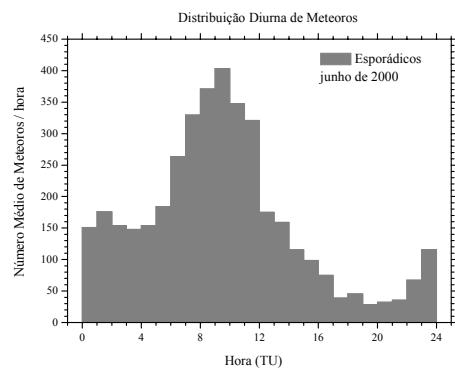


**Fig. 6.12. Distribuições médias do número de meteoros por hora para cada mês do ano 2000.**

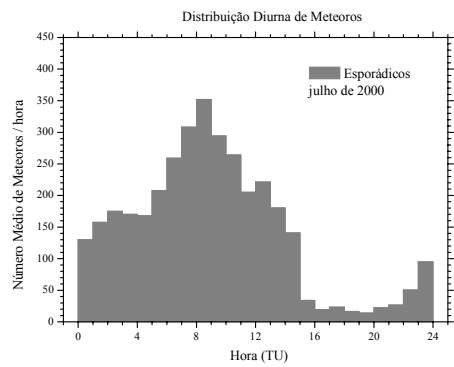
**(continua).**



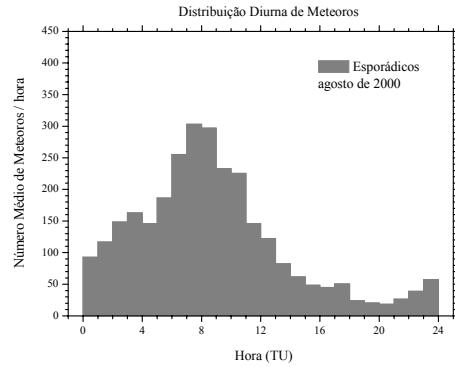
(e)



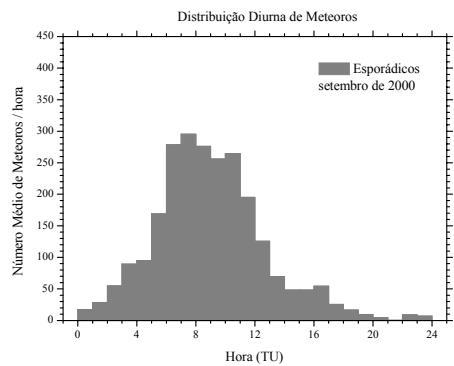
(f)



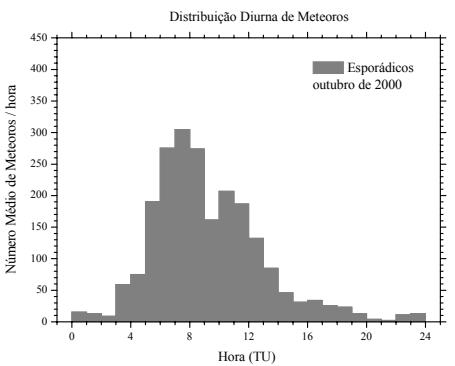
(g)



(h)

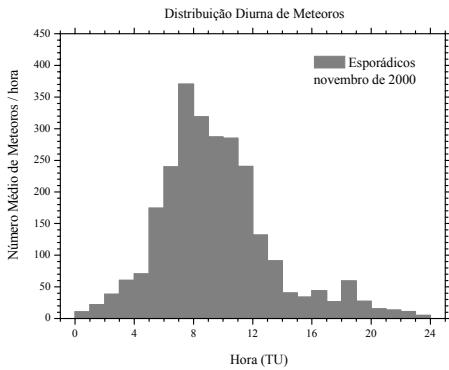


(i)

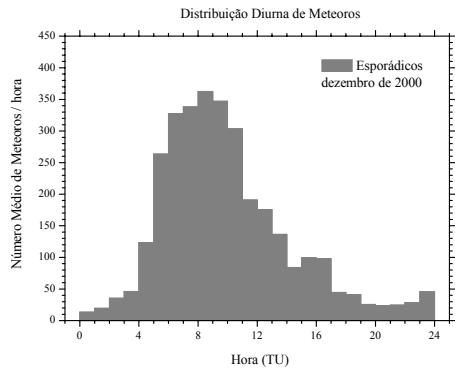


(j)

**Fig. 6.12. Continua.**



(k)



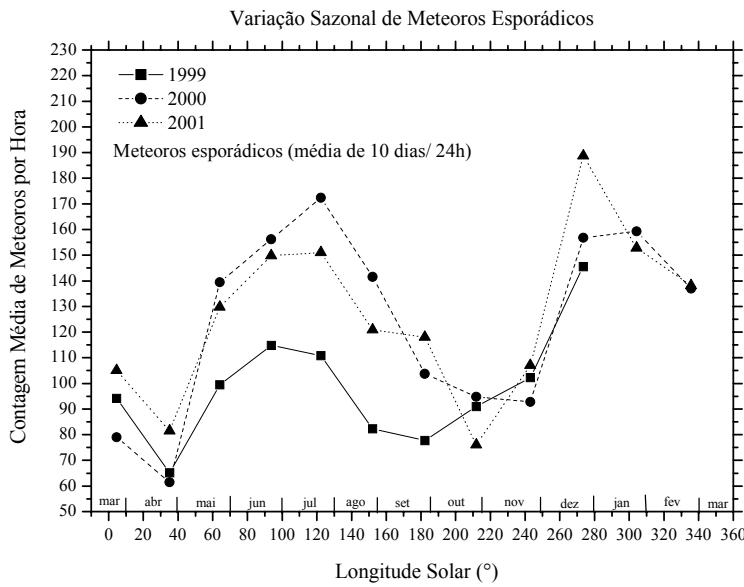
(l)

**Fig. 6.12. Conclusão.**

Estas distribuições mostram que o pico dos esporádicos ocorre, em grande parte, durante o amanhecer, entre as 6h e 8h (TU) e uma queda na contagem a partir de 16h (TU). Este comportamento já era esperado conforme destacado na Seção 2.5. Além disso, há a evidência de que ocorrem pequenas diferenças nas contagens horárias médias mês a mês. Isto reflete também o comportamento sazonal dos esporádicos que é abordado na Seção 6.3.3. A taxa horária média de esporádicos foi determinada a partir da soma das contagens horárias médias de meteoros correspondentes a cada mês divida por 12. Nossa amostra fornece em média 99,6 meteoros esporádicos por hora em 1999. Em 2000, a taxa horária média foi de 125,4 meteoros/h. Em 2001, essa taxa foi de 128,3 meteoros/h. Há uma excelente concordância entre as taxas horárias médias de 2000 e 2001. A pequena discrepância do valor da taxa horária em 1999 pode ser novamente justificada por ser o primeiro ano de funcionamento do radar e por isso alguns dados podem estar comprometidos, principalmente aqueles relativos aos primeiros meses de operação (março e abril de 1999).

### 6.3.3. Variação Sazonal de Meteoros Esporádicos

A Figura 6.13 mostra as distribuições das contagens médias de meteoros por hora em função da longitude solar de 1999 a 2001.

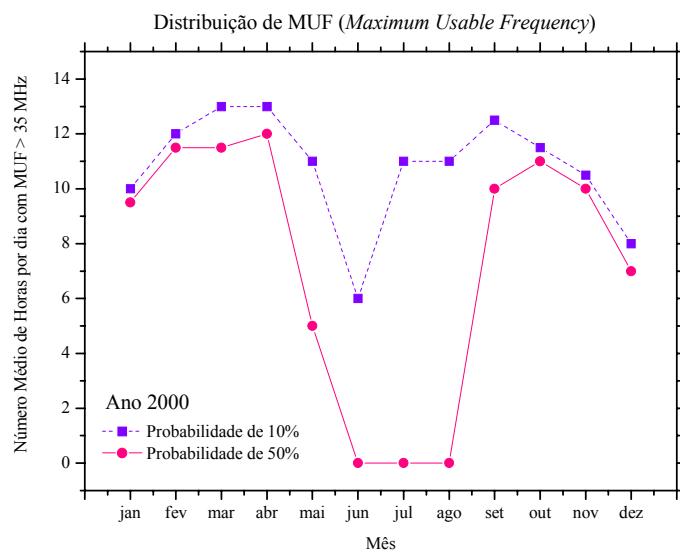


**Fig. 6.13. Comportamento sazonal dos meteoros esporádicos ao longo de 1999, 2000 e 2001.**

Observamos que para os três anos, há uma taxa mínima de ocorrência de meteoros no mês de abril. A partir de maio, começa a ocorrer um aumento na contagem horária, atingindo uma taxa máxima em torno de junho e julho. A partir de agosto, ocorre uma sensível diminuição na taxa de ocorrência de meteoros, caracterizando uma 2<sup>a</sup> taxa mínima de meteoros entre os meses de setembro e novembro. A partir de dezembro o número de meteoros por hora passa novamente a crescer, com uma 2<sup>a</sup> taxa máxima em torno de janeiro e fevereiro, tornado a ter uma queda em março. Em linhas gerais, podemos dizer que os mínimos de contagem horária estão ocorrendo em torno dos equinócios, enquanto que os máximos em torno dos solstícios. Tal resultado difere daquele apresentado na Seção 2.5, que sugere apenas a presença de um único máximo e um único mínimo para a variação de esporádicos ao longo de um ano.

Para explicarmos a Figura 6.13, investigamos possíveis sinais que se propagam via ionosfera do hemisfério norte para o hemisfério sul em freqüências maiores ou iguais a 35 MHz. A escolha do limite inferior da Freqüência Máxima Utilizável (MFU – *Maximum Usable Frequency*) foi em virtude da faixa de operação do radar SKiYMET (35,24

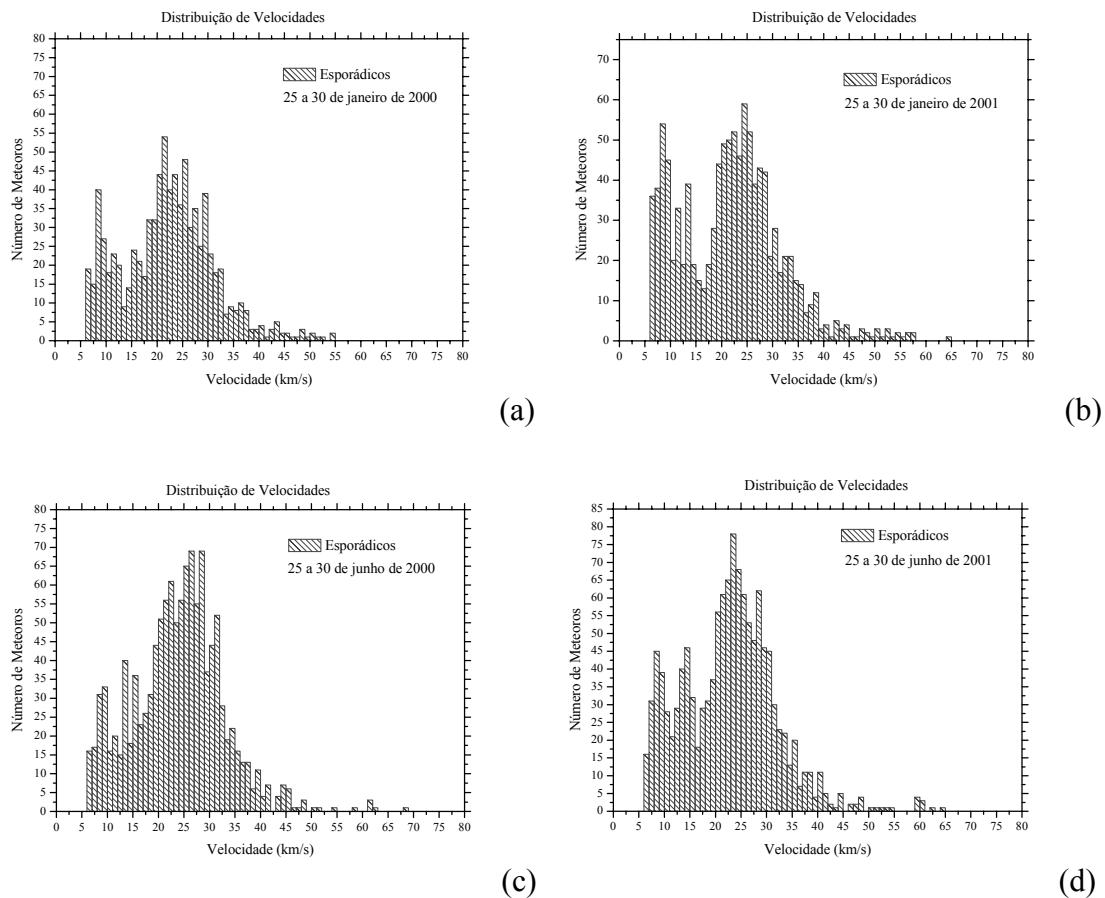
MHz). A Figura 6.14 indica a eficiência de transmissão de sinais via ionosfera com MFU acima de 35 MHz que são provenientes dos Estados Unidos (costa leste) para a América do Sul. Esta Figura foi baseada em previsões de condições ionosféricas nesta região que estão disponíveis no portal *The National Association Amateur Radio* (2003). Pela Figura 6.14, notamos que exatamente durante os meses de fevereiro, março, abril, setembro outubro e novembro esta eficiência na transmissão é máxima. Se compararmos as Figuras 6.13 e 6.14, observamos que os mínimos nas taxas de ocorrências de meteoros coincidem exatamente com os períodos de maior probabilidade de transmissão MFU via ionosfera. Dessa forma, concluímos que o SKiYMET tenha sofrido fortes interferências dentro destes meses, o que afetou os dados analisados. Com isto, não conseguimos obter um gráfico compatível com o comportamento sazonal dos esporádicos esperado para observadores situados abaixo de  $-23,5^{\circ}$  de latitude.



**Fig. 6.14. Distribuição da duração horária média de MFU (Maximum Usable Frequency) acima de 35 MHz para o ano 2000.** A curva pontilhada com símbolos quadrados corresponde à probabilidade de 10% para que transmissão via ionosfera seja bem sucedida dentro do intervalo de horas previsto, enquanto a curva cheia com símbolos redondos corresponde à probabilidade de 50%.

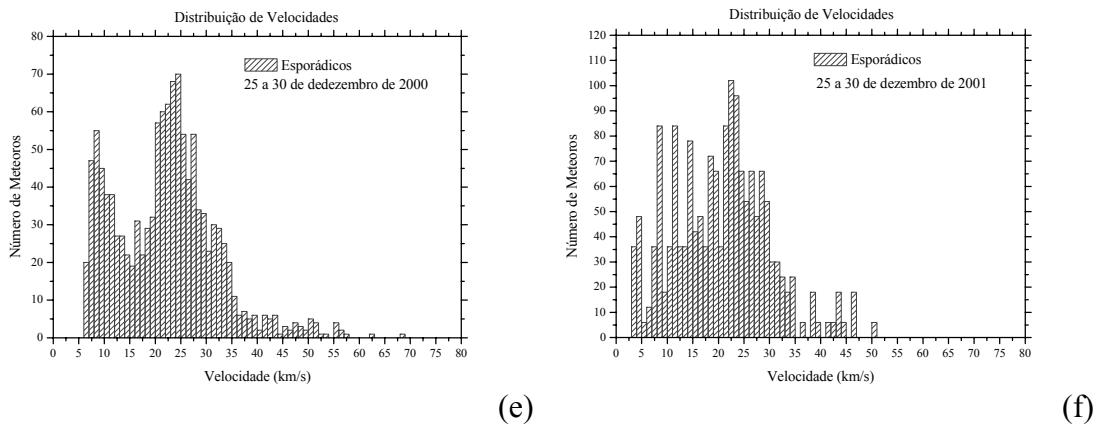
### 6.3.4. Distribuição de Velocidades Geocêntricas

As Figuras 6.15 de (a) a (f) são as distribuições de velocidade de esporádicos (segundo os critérios de análise apresentados na Seção 5.3.3) apenas para os meses de janeiro, junho e dezembro de 2000 e 2001, pois as demais distribuições de velocidades são bem semelhantes a estas. Notamos que estas distribuições possuem um máximo em torno de 22,5 km/s. O pico em 22,5 km/s corresponde exatamente à velocidade média de esporádicos. Há também um segundo pico em torno de 8 km/s. Este pico não é bem definido no gráfico da Figura 6.15(f), porém é bastante claro nos demais gráficos. Esta baixa velocidade pode estar associada aos meteoros artificiais (Cepheha et al., 1998), pois está abaixo do limite de velocidade mínimo previsto para os meteoróides (ver Seção 2.1).



**Fig. 6.15. Histogramas de velocidade para esporádicos em 2000 e 2001.**

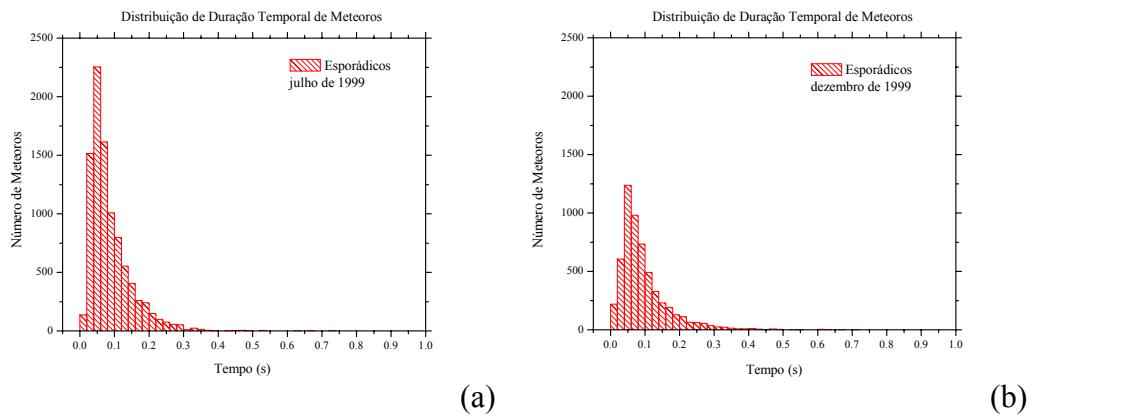
**(continua).**



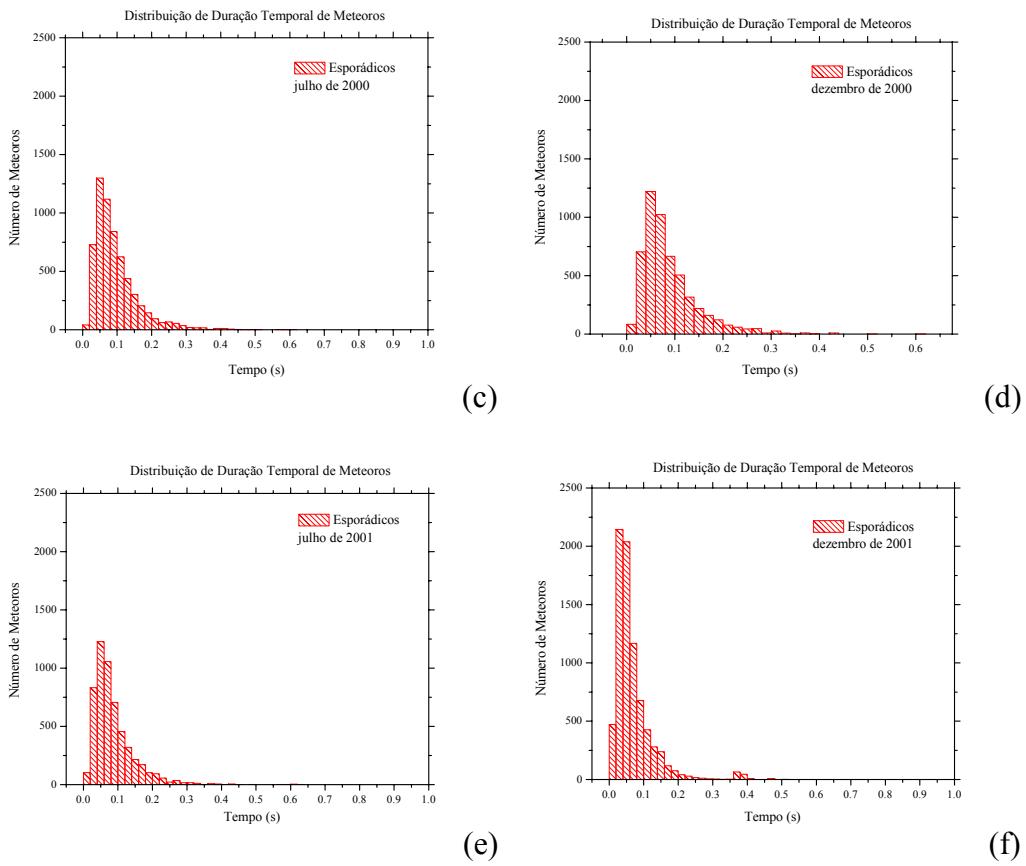
**Fig. 6.15. Conclusão.**

### 6.3.5. Distribuição do Tempo de Duração dos Esporádicos

As Figuras 6.16 de (a) a (f) mostram as distribuições do tempo de duração dos esporádicos apenas para os meses de julho e dezembro de 1999, 2000 e 2001 (segundo critérios da Seção 5.3.4), uma vez que as demais distribuições são bastante parecidas com estas. Notamos que os perfis destas distribuições correspondem a meteoros subdensos e possuem um máximo em torno de 0,05 s. Tal resultado é idêntico aquele encontrado a partir das distribuições obtidas para as chuvas de meteoros (ver Seção 6.2.4).



**Fig. 6.16. Histogramas de tempo de duração para esporádicos em 2000 e 2001.**  
(continua).

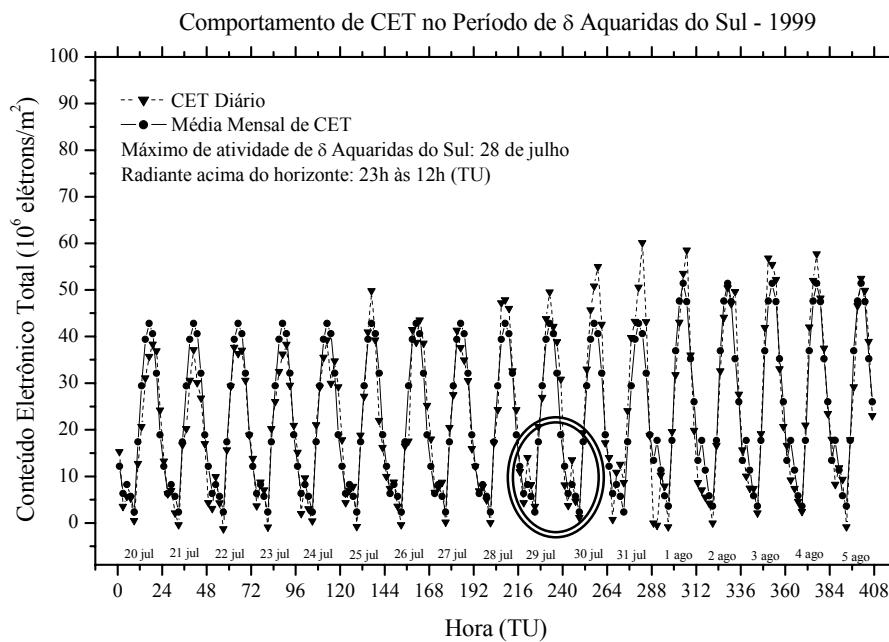


**Fig. 6.16. Conclusão.**

#### 6.4. Efeitos no Conteúdo Eletrônico Total (CET) da Ionosfera

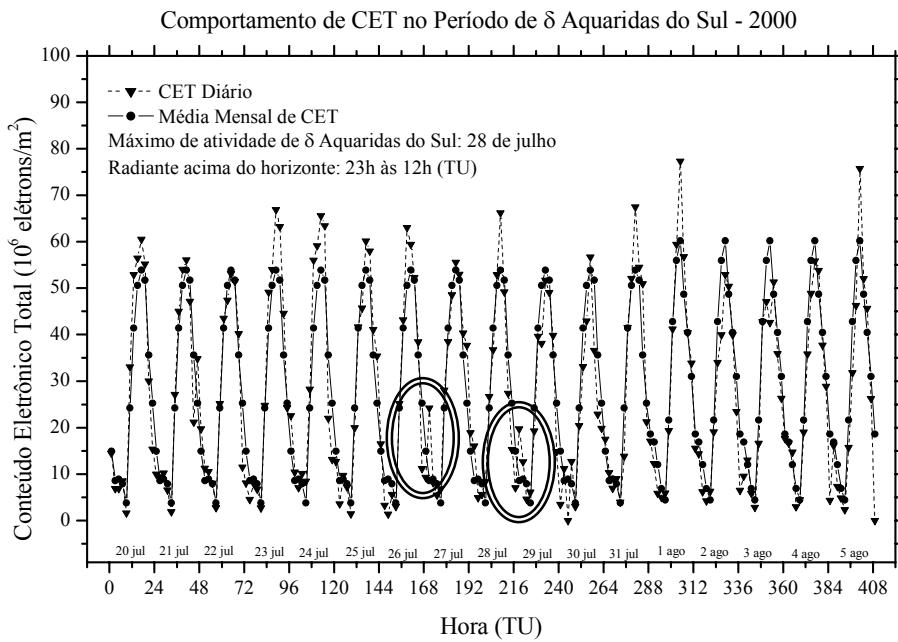
Conforme explicação feita na Seção 5.5, geramos diferentes gráficos de CET. As Figuras 6.17 (a) e (b) apresentam os gráficos de CET para o período de Delta Aquaridas do Sul. Por esses gráficos observamos que, em 1999, existe uma variação aproximadamente de 3 unidades de CET diário em relação à contagem média mensal de CET, nos dias 29 e 30 de julho às 2h TU. É interessante ressaltar que o dia de máxima atividade desta chuva ocorreu em 28 de julho do referido ano. Isto seria um indício de que esta variação poderia ser devido à ocorrência desta chuva, visto que a variação observada em CET ocorre em dias dentro do período da chuva, enquanto seu radiante ainda está acima do horizonte. Contudo, Delta Aquaridas do Sul é uma chuva que apresenta uma contagem de meteoros expressiva e bastante homogênea em torno do dia de máxima ativida-

de. Desta forma seria esperado que se a variação de CET fosse devido ao efeito desta chuva, então os demais dias próximos ao seu máximo também deveriam apresentar alguma alteração nas contagens diárias de CET. Além disso, o gráfico de 2000 mostra que a variação de CET não ocorre nos mesmos dias em que foram observadas variações de CET em 1999 (27 e 29 de julho, aproximadamente às 2 h TU).



**Fig.6.17. Comportamento de CET diário sobreposto à média mensal de contagem eletrônica ionosférica ao longo do período da chuva Delta Aquaridas do Sul em (a) 1999 e (b) 2000. Excessos de CET são destacados com elipses.**

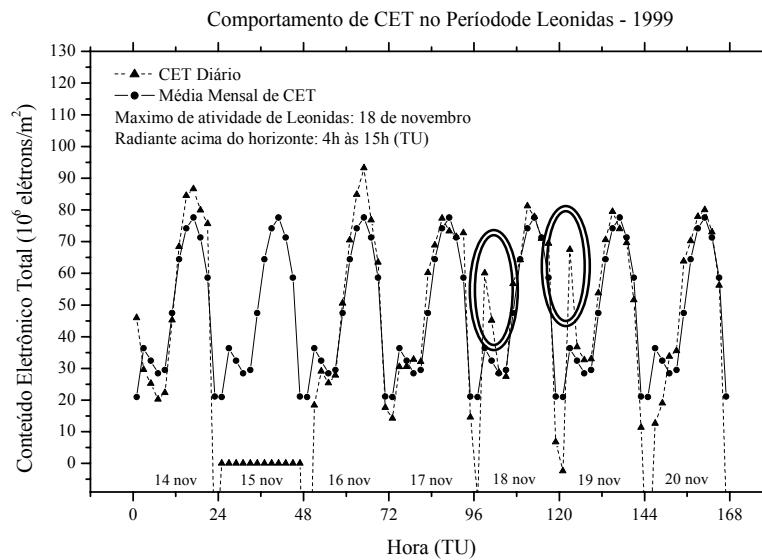
(continua).



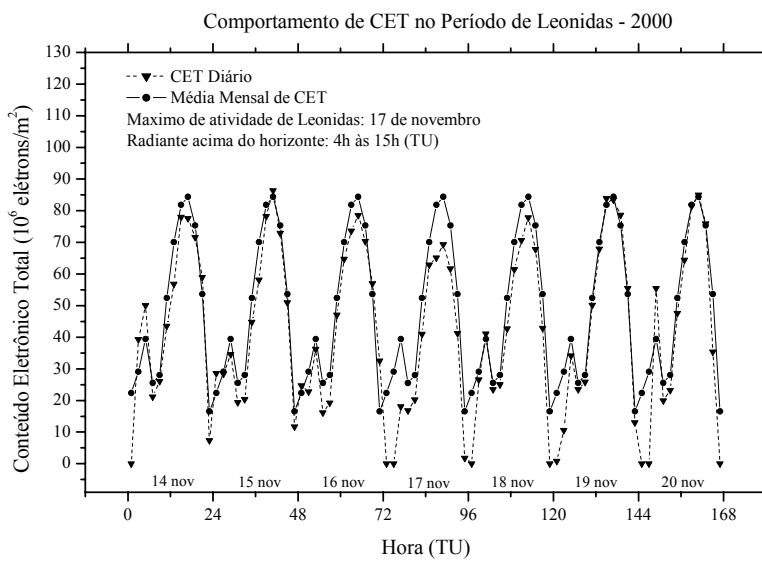
(b)

**Fig.6.17. Conclusão.**

As Figuras 6.18 (a) e (b) representam o comportamento de CET no período de Leonidas. Notamos que, em 1999, há uma variação interessante de CET nos dias 18 e 19 de novembro às 4h TU. Porém neste ano, esta chuva só ocorreu no dia 18 e seu radiante nasce exatamente na hora referenciada, o que descarta o fato desta chuva ter promovido tal efeito observado. Em 2000, quando Leonidas acontece nos dias 17 e 18 de novembro, não há nenhum registro de variações de CET.



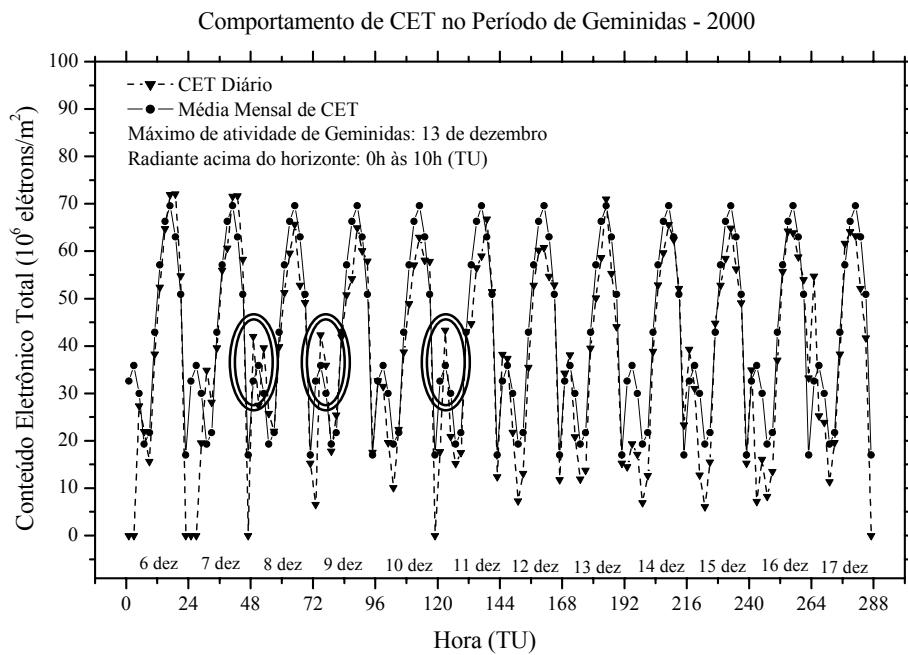
(a)



(b)

**Fig. 6.18. Comportamento de CET diário sobreposto à média mensal de contagem eletrônica ionosférica ao longo do período da chuva Leonidas em (a) 1999 e (b) 2000. Excessos de CET são destacados com elipses.**

Na Figura 6.19 temos o gráfico de CET para Geminidas em 2000, não havendo informações de CET para 1999 dentro do período desta chuva de meteoros. De forma análoga as demais chuvas, durante a ocorrência de Geminidas não há nenhum excesso de CET que ocorra de forma sistemática para afirmarmos que tal variação é devido a esta chuva.



**Fig. 6.19. Gráfico do comportamento de CET diário sobreposto à média mensal de contagem eletrônica ionosférica ao longo do período da chuva Geminidas em 2000. Excessos de CET são destacados com elipses.**

Portanto, a partir de uma análise simples dos gráficos de CET apresentados, sem avaliarmos as atividades solar e geomagnética do período (uma vez que ambas que podem causar variações apreciáveis no conteúdo eletrônico da ionosfera terrestre, em particular durante os períodos de alta atividade solar), temos indicação que as chuvas de meteoros, em princípio, não possuem correlação alguma com excessos de CET diários observados nos durante os períodos citados. Contudo, não sabemos que fatores seriam responsáveis por tais variações ocorridas em horários noturnos.

## 6.5. Discussões Finais

### 6.5.1. Delta Aquaridas do Sul (DAS)

Durante os meses de julho e agosto muitos radiantes de meteoros parecem vir da região do complexo Capricórnio-Aquário. São conhecidas várias chuvas associadas a esse complexo tais como Iota Aquaridas do Norte, Iota Aquaridas do Sul, Delta Aquaridas do Norte e Delta Aquaridas do Sul, e distintas estruturas oriundas da constelação de Capricórnio. De qualquer forma, as chuvas Delta Aquaridas do Norte e Delta Aquaridas do Sul são as mais ativas dentre todas e por isso se destacam. Os meteoros provenientes do sul da constelação de Aquário estão associados à chuva Delta Aquaridas do Sul. O cometa associado ao feixe de meteoróides que dá origem a esta chuva é o cometa 96P/Machholz (Babadzhanov & Obrubov, 1992).

A Tabela 6.1 apresenta os parâmetros obtidos para esta chuva, nos três anos analisados. A velocidade média desta chuva é de 41km/s (McKinley, 1961; Cepheha et al., 1998), o que está em concordância com o intervalo de velocidades por nós encontrado (40-45 km/s), cujo valor médio é de 42,5 km/s. A maioria dos meteoros dessa chuva (aquarídeos) se forma em torno de 90 km de altitude. Essa chuva é a que apresenta o maior período de duração. Analisando-se os três anos, essa chuva cobriu o período de 19 de julho a 16 de agosto, tendo seu máximo de atividade em 28 ou 29 de julho. Isto sugere que o feixe associado a esta chuva deva ser relativamente antigo. De nossa amostra é a chuva com declinação mais ao sul em relação ao equador celeste: a posição média do radiante está em 23 horas de ascensão reta e em  $-16^{\circ}$  de declinação.

Em nossa latitude, esta chuva permanece acima do horizonte por 13 h (nascer às 23 h TU; ocaso às 12 h TU) e apresenta alta taxa horária média de meteoros (cerca de 84,0 meteoros/h). A distribuição diurna dos aquarídeos apresenta dois máximos. Estes máximos podem ser tanto uma característica da chuva quanto um efeito instrumental. Tal fenômeno precisaria ser explorado melhor, pois qualquer um dos argumentos citados é bastante plausível.

**TABELA 6.1. Resultado da análise de Delta Aquaridas do Sul (DAS) para 1999, 2000 e 2001.**

<b>DAS / Anos</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>
<b>Período</b>	19 jul a 12 ago	19 jul a 16 ago	19 jul a 11 ago
<b>Máx. Atividade</b>	28 jul	28 jul	29 jul
<b>AR (<math>\pm 0,07</math> h)</b>	23,00	23,20	22,90
<b>DEC (<math>\pm 1^\circ</math>)</b>	-15	-15	-17
<b>V (km/s)</b>	---	42,5	42,5
<b>Pico de Altura de Ablação (<math>\pm 2</math>km)</b>	90	90	89
<b>Taxa horária Média</b>	68,9 met./h	91,9 met./h	91,3 met./h

### 6.5.2. Leonidas (LEO)

A chuva Leonidas tem sido observada por mais de 1000 anos. A região do céu de onde surge o radiante de Leonidas situa-se na porção noroeste da constelação do Leão. A cada 33 anos o feixe de meteoróides desta chuva sofre um enriquecimento devido à passagem do cometa 55P/ Tempel-Tuttle pelo periélio (Brown et al., 1997).

A Tabela 6.2 lista os parâmetros obtidos para Leonidas nos três anos de nossa amostra de dados. Segundo Ceplecha et al. (1998), a duração dessa chuva de meteoros cobre o período de 14 a 21 de novembro. Contudo, verificamos pela nossa análise, que esta chuva durou apenas um dia em 1999 e 2001, e dois dias em 2000 (ano em que Leonidas apresentou um excesso em suas contagens de meteoros).

O máximo de atividade de Leonidas ocorre no dia 17 ou 18 de novembro. A posição média de seu radiante corresponde a 10,3 horas em ascensão reta e  $+22^\circ$  em declinação. O radiante desta chuva permanece acima do horizonte de 4h às 15h (TU). Associados a esta chuva existem muitos meteoros (leonídeos) brilhantes com trilhas de longa duração

(McKinley, 1961). A taxa horária média de meteoros para Leonidas é de 19,0 meteoros/h.

**TABELA 6.2. Resultado da análise de Leonidas (LEO) para 1999, 2000 e 2001.**

LEO/ Anos	1999	2000	2001
<b>Período</b>	18 nov	17 a 18 nov	18 nov
<b>Máx. Atividade</b>	18nov	17 nov	18 nov
<b>AR (<math>\pm 0,07</math> h)</b>	10,30	10,30	10,30
<b>DEC (<math>\pm 1^\circ</math>)</b>	+23	+21	+22
<b>V (km/s)</b>	---	56,0	56,0
<b>Pico de Altura de Ablação (<math>\pm 2</math>km)</b>	> 95	> 95	> 95
<b>Taxa horária Média</b>	11,4 met./h	21,1 met./h	24,4 met./h

A velocidade média desta chuva varia em torno de 71 e 72 km/s (McKinley, 1961; Cephecha et al., 1998). Nossa análise possui uma dispersão muito grande no intervalo de velocidade possivelmente associado com a ocorrência dos leonídeos (45-67 km/s) e, além disso, o espaço amostral de velocidades para Leonidas é muito baixo. Por estes motivos, o valor médio de 56 km/s, apesar de alto, é bem diferente daquele publicado na literatura e não muito confiável. A altura de ablação dos leonídeos ocorre acima de 95 km. Este resultado é compatível com aqueles encontrados a partir de observações realizadas com radares SKiYMET localizados em diferentes latitudes (Mardoc Inc., 2001).

### 6.5.3. Geminidas (GEM)

Geminidas foi registrada pela primeira vez em 1862. O radiante dessa chuva surge na região norte da constelação de Gêmeos, próximo às duas estrelas de maior brilho dessa constelação (Castor e Pollux). Acredita-se que a origem do feixe meteórico de Geminidas

das esteja associada com o asteróide Apollo 3200 Phaethon (Whipple, 1983), uma vez que os parâmetros orbitais de ambos são bastante coincidentes.

A Tabela 6.3 mostra os parâmetros encontrados para Geminidas durante cada ano de nossa análise. A duração dessa chuva de meteoros cobre o período de 6 a 17 de dezembro com máximo de atividade no dia 13. A posição média de seu radiante é 7,5h em ascensão reta e  $+32^{\circ}$  em declinação. Seu radiante permanece acima do horizonte por 10h para observadores situados a  $-23^{\circ}$  de latitude (nascer às 0h TU; ocreo às 10h TU).

**TABELA 6.3. Resultado da análise de Geminidas (GEM) para 1999, 2000 e 2001.**

<b>GEM / Anos</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>
<b>Período</b>	6 a 17 dez	6 a 16 dez	6 a 16 dez
<b>Máx. Atividade</b>	13	13	13
<b>AR (<math>\pm 0,07</math> h)</b>	7,5	7,5	7,5
<b>DEC (<math>\pm 1^{\circ}</math>)</b>	$+32$	$+32$	$+32$
<b>V (km/s)</b>	---	35	35
<b>Pico de Altura de Ablação (<math>\pm 2</math>km)</b>	91	90	91
<b>Taxa horária Média</b>	85,0	96,8	89,9

Os meteoros associados a essa chuva (geminídeos) são brilhantes e têm velocidades de 35 km/s (McKinley, 1961; Ceplecha et al., 1998). Este resultado é exatamente igual ao valor médio derivado do intervalo de velocidades encontrado em nossa análise para esta chuva. A taxa horária média de Geminidas é 90,6 meteoros/ h. A altura típica de formação dos geminídeos é em torno de 91 km.

#### **6.5.4. Meteoros Esporádicos**

Os esporádicos são formados tipicamente em torno de 90 km de altura. Encontramos uma velocidade geocêntrica média para estes meteoros igual a 22,5 km/s, a qual está abaixo do valor esperado de aproximadamente 36 km/s (Hawkins & Southworth, 1958). Contudo, pelo modelo de densidade atmosférica em função do raio de meteoróides, onde podemos verificar qual é a altura de ablação das partículas (ver Apêndice 5), parece que o nosso valor de velocidade é bastante razoável, se considerarmos a altitude de ablação típica por nós inferida.

A partir dos valores fornecidos na Seção 6.3.2, calculamos a taxa horária média de esporádicos, considerando-se os três anos analisados. Ocorrem cerca de 117,8 meteoros esporádicos por hora.

#### **6.5.5. Comparação de Resultados**

A Tabela 6.4 lista os resultados finais obtidos para as chuvas de meteoros e meteoros esporádicos decorrentes de nossa análise. Comparando os resultados para as chuvas de meteoros com os que são apresentados nas tabelas publicadas por McKinley (1961) e Ceplecha et al. (1998), nota-se uma excelente concordância entre a maioria das propriedades derivadas de nossa análise com aquelas publicadas por estes autores (Tabela 6.5). Isto demonstra que as chuvas de meteoros são, de fato, fenômenos bastante regulares e com características bem definidas.

**TABELA 6.4. Resultado geral da análise para os meteoros esporádicos (ESP) e as chuvas de meteoros DAS, LEO e GEM.**

	<b>DAS</b>	<b>LEO</b>	<b>GEM</b>	<b>ESP</b>
<b>Período</b>	19 jul a 16 ago	17 a 18 nov	6 a 17 dez	---
<b>Máx. Atividade</b>	28 ou 29 jul	17 ou 18	13	---
<b>Nascer/Ocaso (TU)</b>	23 h/12 h	4 h/15 h	0h /10 h	---
<b>AR (<math>\pm 0,07h</math>)</b>	23,00	10,3	7,5	---
<b>DEC (<math>\pm 1^\circ</math>)</b>	-16	+22	+32	---
<b>V (km/s)</b>	42,5	56,0	35,0	22,5
<b>Pico de Altura de Ablação (<math>\pm 2</math> km)</b>	90	> 95	91	90
<b>Taxa horária Média</b>	84,0	19,0	90,6	117,8

Nossa amostra de chuvas meteóricas inclui aquelas de longa, média e curta duração, mostrando que seus feixes de meteoróides possuem diferentes histórias de evolução. Conforme discussão feita na Seção 2.3.1, de forma especulativa, podemos sugerir que o feixe associado a DAS seja o mais antigo de todos, seguido pelo feixe de GEM e LEO. Evidentemente que para conhecermos a idade de um feixe de meteoróides é preciso termos informações mais precisas de seus parâmetros dinâmicos e orbitais.

De um ano para outro, estas chuvas alteram muito pouco sua periodicidade, bem como seus dias de máxima atividade meteórica e o tempo em que seus radiantes permanecem acima do horizonte de um dado observador. Além disso, outro parâmetro que quase não se altera é a posição média dos radiantes destas chuvas, em coordenadas equatoriais celestes. Contudo dentro do período de uma chuva, pode haver pequenas variações na posição do seu radiante dia-a-dia (McKinley, 1961), cuja causa não iremos detalhar aqui.

**TABELA 6.5. Resultados publicados para as chuvas DAS, LEO e GEM por McKinley (1961) e Ceplecha et al. (1998).**

<i>McKinley</i>	DAS	LEO	GEM
<b>Período</b>	21 jul a 15 ago	14 a 20 nov	7 a 15 dez
<b>Máx. Atividade</b>	29 jul	16 nov	13 dez
<b>AR (h)</b>	22,6	10,1	7,5
<b>DEC (°)</b>	-17	+22	+32
<b>V (km/s)</b>	41	72	35
<b>Taxa horária Média (THZ)</b>	20	5	50
<i>Ceplecha et al.</i>	DAS	LEO	GEM
<b>Período</b>	12 jul a 19 ago	14 a 21 nov	4 a 17 dez
<b>Máx. Atividade</b>	28 jul	17 nov	14 dez
<b>AR (h)</b>	22,6	10,2	7,5
<b>DEC (°)</b>	-16	+22	+33
<b>V (km/s)</b>	41	71	35
<b>Taxa horária Média</b>	---	---	---

As propriedades discutidas a seguir são consideradas como parâmetros gerais dos meteoros por serem comuns tanto para chuvas quanto para esporádicos:

Existe uma correlação entre a altura de ablação, velocidade e tamanho de um meteoróide (McKinley, 1961; Hughes, 1978). A altura de queima dos aquarídeos, geminídeos e esporádicos é em torno de 90 km. Tal resultado é compatível com as moderadas e baixas velocidades médias (entre 20 e 45 km/s) encontradas para estas classes de meteoros. Os leonídeos vaporizam acima de 95 km de altura, o que é esperado para meteoros com altas velocidades ( $> 55$  km/s).

Finalmente, as chuvas de meteoros que mais contribuem com partículas por hora são a DAS e a GEM. As taxas horárias médias dos aquarídeos e geminídeos são bastante semelhantes e quase não variam de ano para ano. Já a taxa horária média dos leonídeos é baixíssima, mesmo no ano em que houve maior contribuição de partículas da chuva LEO (ano 2000). De qualquer forma, são os esporádicos que apresentam a maior taxa horária média de ocorrência.



## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÕES

O estudo de meteoros utilizando radar permite realizarmos uma análise detalhada e ampla das propriedades de chuvas de meteoros e meteoros esporádicos, a partir de uma amostra homogênea obtida ao longo de anos consecutivos.

O método empregado para determinação dos radiantes de chuvas meteóricas é bastante preciso, uma vez que os valores encontrados para as coordenadas dos radiantes das chuvas analisadas coincidem com aqueles publicados na literatura, dentro do erro do método aplicado.

O método de separação de meteoros proposto para eliminar grande parte dos esporádicos contidos em dados correspondentes aos períodos de chuvas de meteoros, apresentou resultados satisfatórios ao analisarmos a distribuição de meteoros de chuvas em função de altura, hora e velocidade geocêntrica. Porém, o resultado da velocidade geocêntrica média dos leonídeos não é confiável, o que atribuímos ao fato de haver poucos dados de velocidade para os meteoros de Leonidas.

As chuvas de meteoros analisadas têm características bem definidas e se mostram bastante regulares. Algumas destas chuvas possuem aspectos em comum entre si e entre meteoros esporádicos. Contudo, o fato dos perfis quase-exponenciais das distribuições do tempo de duração das trilhas de meteoros para chuvas e esporádicos serem idênticos é devido aos meteoros detectados pelo radar SKiYMET serem subdensos.

Finalmente, verificamos que as chuvas de meteoros não estão relacionadas com variações ocorridas no conteúdo eletrônico total da ionosfera. O valor de CET reflete praticamente o conteúdo eletrônico da camada-F da ionosfera, pois esta camada é a que apresenta maior ionização. Assim, a probabilidade de obtermos informações sobre variações eletrônicas na camada-D é muito baixa, sendo esta camada a região da ionosfera

em que a maioria dos meteoros é formada. Portanto, dificilmente conseguiríamos comprovar qualquer tipo de perturbação meteórica na ionosfera com medidas de CET.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abell, G. O. **Exploration of the universe**. Nova York: Holt; Rinehart and Winston, 1975. 738 p.

Babadzhanov, P. B.; Obrubov, Y. V. P/ Machholz and quadrantid meteoroid stream. Orbital evolution and relationship. In: Harris, A. W.; Bowell, T. ed. **Asteroids, comets, meteors 1991**. Houston: LPI, 1992. p. 27-31.

Baggaley, W. J. Advanced meteor orbit radar observations of interstellar meteoroids. **Journal of Geophysical Research**, v.105, n. A5, p. 10353-10362, May 2000.

Boas, J. W. S. V.; Piazza, L. R.; Paes Leme, N. M.; Da Costa, A. M.; Macedo Moura, M. S. S. Local long-distance effects of meteor showers in low ionosphere. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 48, n. 7, p. 643-648, 1986.

Brown, P.; Simek, M.; Jones, J. Radar observations of the Leonids: 1964-1995. **Astronomy and Astrophysics**, v. 322, n. 2, p. 687-695, June 1997.

Browne, I. C.; Bullough, K.; Evans, S.; Kaiser, T. R. Characteristics of radio echoes from meteor trails II: the distribution of meteor magnitudes and masses. **Proceedings of the Physical Society**, v. B69, n. 1, p. 83-97, 1956.

Ceplecha, Z.; Borovicka, J.; Elford, W. G.; Revelle, P. O.; Hawkes, R. L.; Porubcan, V.; Simek, M. Meteor phenomena and bodies. **Space Science Reviews**, v. 84, n. 3-4, p. 327-471, 1998.

Cervera, M. A.; Elford, W. G.; Steel, D. I. A new method for the measurement of the meteors speeds: the pre- $t_0$  phase tecnique. **Radio Science**, v. 32, n. 2, p. 805-816, 1997.

Chamberlain, J. W. **Theory of planetary atmospheres; an introduction to their physics and chemistry**. Nova York: Academic Press, 1978.

Davies, J. G. Advances in electronics and electron physics. In: **Radio observation of meteors**. Nova York: Academic, 1957. v. 9. p. 95-128.

Farlow, N. H.; Ferry, G. C.; Blanchard, M. B. Examination of surfaces exposed to a noctilucent clouds. **Journal of Geophysical Research**, v. 75, n. 33, p. 6736, 1970.

Felli, M.; Spencer, R. E. **Very long baseline interferometry**. Boston: Kluwer Academic, 1988.

Fonseca Júnior, E. S. **O sistema GPS como ferramenta para avaliação da refração ionosférica no Brasil**. 2002. 176 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

Grebowsky, J. M.; Goldberg, R. A.; Pesnell, W. D. Do meteor showers significantly perturb the ionosphere?. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 60, n. 6, p. 607-615, 1998.

Hawkes, R. L. Television Meteoros. In: Stohl, J. e Williams, I. P. ed. **Meteoroids and their parent bodies**. Bratislava: Polygrafia SAV, 1993. p. 227-234.

Hawkes, R. L.; Jones, J. Eletro-optical meteor observation techniques and results. **Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society**, v. 27, n. 4, p. 569-589, 1986.

Hawkins, G. S.; Southworth, R. B. The statistics of meteors in the earth's atmospheres. **Smithsonian Astrophysical Observatory Contributions to astrophysics**, v. 2, p. 349-364, 1958.

Headline Universe, **Space debris update**. ©1995-1999 e 2000, University of Michigan; ©2000-2002, University Corporation for Atmospheric Research. Disponível em: <[http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/headline\\_universe/space\\_debris\\_update.html](http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/headline_universe/space_debris_update.html)>. Acesso em: ago. 2002.

Hocking, W. K. Real-time meteor entrance speed determinations made with interferometric meteor radars. **Radio Science**, v. 35, n. 5, p. 1205-1220, 2000.

Hocking, W. K.; Fuller, B.; Vandepeer, B. Real-time determination of meteor-related parameters utilizing modern digital technology. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 63, n. 2-3, p. 155-169, 2001.

Hughes, D. W Meteor. In: McDonnell, J. A. M. ed. **Cosmic Dust**. Nova York: John Wiley & Sons, 1978. p. 123-185.

Jones, J.; Brown, P. The radiant distribution of sporadic meteors. **Planetary and Space Science**, v. 42, n. 2, p. 123-126, 1994.

Jones, J.; Hawkes, R. L. Television observations of faint meteors II - Light curves. **Monthly Notice of the Royal Astronomical Society**, v. 171, n. 1, p. 159-169, April 1975.

Jones, J.; Kaiser, T. R. The effects of thermal radiation, conduction and meteoroid heat capacity on meteoric ablation. **Monthly Notice of the Royal Astronomical Society**, v. 133, n. 4, p. 411-420, 1966.

Jones, J.; Morton, J. D. High-resolution radar studies of the Geminid meteor shower. **Monthly Notice of the Royal Astronomical Society**, v. 200, n. 1, p. 281-291, 1982.

Kaiser, T. R.; Class R. L. Theory of radio reflections from meteor trails. **Philosophical Magazine**, v. 43, n. 336, p. 1-32, 1952.

Kaiser, T. R; Jones, J. The ablation of solid meteoroids. In: **Physics and Dynamics of Meteoros**. Holanda: D. Reidel Pub. Co., 1968. p.205.

Kaufmann, P.; Kuntz, V.L.; Paes Leme, N.M.; Piazza, L.R.; Vilas-Boas, J.W.S.; Brecher, K.; Crouchley Effects of the large June 1975 meteoroid storm on earth's ionosphere. **Science**, v. 246, n. 10, p. 787-790, Nov. 1989.

Kirchhoff, V. W. J. H.; Takahashi, H. Sodium clouds in the lower thermosphere. **Planetary and Space Science**, v. 32, n. 7, p. 831-836, July 1984.

Kirkwood, D. **Meteoric astronomy**: a treatise on shooting-star, fire-balls, and aerolites. Philadelphia: J.B. Lippincott & co., 1867. 129p.

Landgraf, M.; Baggaley, W. J.; Grun, E.; Kruge, H.; Linkert, G. Aspects of the mass distribution of interstellar dust grains in the solar system from in situ measurements. **Journal of Geophysical Research Space Physics**, v.105, n. A5, p. 10343-10352, May 2000.

Lebedinet, V. N.; Shushkova V. B. Meteoric ionization. **Geomagnetism and Aeronomy**, v. 14, n. 2, p. 228-231, 1974.

Lèna, P.; Lebrun, F.; Mignard, F. **Observational astrophysics**. Berlim: Springer. 1998. 512 p.

Link, F.; Robley, R. Meteoritic contamination of the upper atmosphere by Quadrantid shower. **Planetary Space Science**, v. 19, n. 11, p. 1585-1587, 1971.

Lovell, A. C. B. **Meteor astronomy**. Nova York: University Press Oxford, 1954. 463 p.

Mardoc Inc. ©2001. **SKiYMET observations of the november 2001 Leonids meteor storms.** Disponível em: <<http://members.rogers.com/leonidsbyradar/2001.htm>>. Acesso em: nov. 2001.

McKinley, D. W. R. **Meteor science and engineering.** Nova York: McGraw-Hill, 1961. 302 p.

Müller, H. G. Long period meteor wind oscillations. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A-Mathematical and Physical Sciences**, v. 271, n. 1217, p. 585, 1972.

Murakami, T. On the annual variation of sporadic meteors I and II. **Publications of the Astronomical Society of Japan**, v. 7, n. 2, p. 49-64, 1955.

Naumann, R. J.; Clifton, K. S. Mass influx obtained from low-light television observations of faint meteors. In: Evolutionary and Physical Properties of Meteoroids, Proceedings of IAU Colloq. 13, Albany, NY, 14-17 June 1971. Ed. Curtis L. Hemenway; Peter M. Millman and Allan F. Cook. **National Aeronautics and Space Administration SP**, v. 319, p. 45, 1973.

Öpik, E. J. **Physics of meteors flight in the atmosphere.** Nova York: Interscience, 1958.

Paes Leme, N. M. **Efeitos das chuvas de meteoros na ionosfera terrestre.** 1994. 189 p. Tese (Doutorado em Ciência Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1994. INPE 5591-TDI/552.

Rosen, J. M. Stratospheric dust and its relationship to the meteoric influx. **Space Science Reviews**, v. 9, n. 1, p.58, 1969.

Rothacher, M.; Mervart, L. **Bernese GPS software – version 4.0.** Switzerland: Astronomical Institute, University of Bern, 1996. 418 p.

Schiaparelli, J. V. **Note e Reflexioni sulla theoria astronomica della stella cadenti.** Florença: Stamperia, 1866.

Skolnik, M. I. **Introduction to radar systems:** international student edition. Tóquio: McGraw-Hill Kogakusha LTD. 1962. 648 p.

Steel, D. I.; Asher, D. J.; Clube, S. V. M. The structure and evolution of the taurid complex. **Monthly Notice of the Royal Astronomical Society**, v. 251, n. 4, p. 632-648, 1991.

Tacione, T. F. **Introduction to the space enviroment.** Malabar: Orbit Book Company, 1988. 116 p.

Taylor, A. D.; Baggaley, W. J.; Bennett, R. G. T.; Steel, D. I. Radar measurements of very high velocity meteors with AMOR. **Planetary and Space Science**, v. 42, n. 2, p. 135-140, 1994.

The National Association Amateur Radio (ARRL), ***QST Propagation Charts – 1999-2002.*** ©2003, American Radio Relay League. Disponível em: <<http://www.arrl.org/qst/prospcharts/oldcharts.htm>>. Acesso em: fev. 2003.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Astronomia e Astrofísica, **O sistema solar.** © Os textos, gráficos e imagens deste sítio (site) têm registro: ISBN 85-7025-540-3 (2000). Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/ast/solar/portug/comet.htm>>. Acesso em: dez. 2002.

Vilas-Boas, J. W. S.; Myers, P. C.; Fuller G.A. Dense cores of dark clouds. XII. (CO)-C-13 and (CO)-O-18 in Lupus, Corona Australis, Vela, and Scorpius. **The Astrophysical Journal**, v. 532, n. 2, p. 1038-1050, 2000.

Weiss, A. A. The distribution of the orbits of the sporadic meteors. **Australian Journal of Physics**, v.10, p. 77-102, 1957.

Whipple, F. L. The theory of micrometeorites I. In an isothermal atmosphere. **Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America**, v. 36, n. 12, p. 687-695, 1950a.

Whipple, F. L. A comet model I. The acceleration of comet Encke. **Astrophysical Journal**, v. 111, n. 2, p. 375-394, 1950b.

Whipple, F. L. The theory of micrometeorites II. In an heterothermal atmosphere. **Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America**, v. 37, n.1, p.19-30, 1951a.

Whipple, F. L. A comet model II. Physical relation for comets and meteors. **Astrophysical Journal**, v. 113, n. 3, p. 464-474, 1951b.

Whipple, F. L. Photographic meteor orbits and their distribution in space. **Astronomical Journal**, v. 59, n. 6, p. 201-217, 1954.

Whipple, F. L. Comets. In: McDonnell, J. A. M. ed. **Cosmic Dust**. Nova York: John Wiley & Sons, 1978. p. 1-73.

Whipple, F. L. TB and the geminid meteors. **IAU (International Astronomical Union) Circular** 3881, 1983.

Whitehead, J. D. Recent work on mid-latitude and equatorial sporadic-E. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.51, n. 5, p. 401-424, 1989.

Williams, I. P. The dynamics of meteoroids streams. In: Stohl, J. e Williams, I. P. **Meteoroids and their parent bodies**. Bratislava: Polygrafia SAV, 1993. p. 31-40.

Zhou, Q. H.; Mathews, J. D. Incoherent scatter radar study of the impact of the meteoric influx on nocturnal E-region ionization. **Geophysical Research Letters**, v. 26, n. 13, p. 1833-1836, July 1999.

## APÊNDICE 1

### COMETAS

Ao atravessarem o sistema solar, os cometas ejetam, por sublimação, gases constituintes de sua estrutura, juntamente com partículas sólidas (grãos de poeira denominados meteoróides) à medida que se aproximam do Sol. Estas partículas permanecem associadas às órbitas destes cometas ou, devido a processos de colisão, espalham-se assumindo órbitas em princípio randômicas. Nestas configurações, estas partículas passam a permear o meio interplanetário.

De forma indireta, podemos constatar a presença dos meteoróides no espaço sideral através de fenômenos como, por exemplo, a **luz zodiacal** (luz do Sol espalhada pelos grãos que estão contidos na eclíptica) e os **meteoros** (interação destes grãos com a atmosfera terrestre). A partir do estudo de cometas e meteoróides podemos, enfim, ter uma melhor compreensão do ambiente em que vivemos e da nossa própria origem.

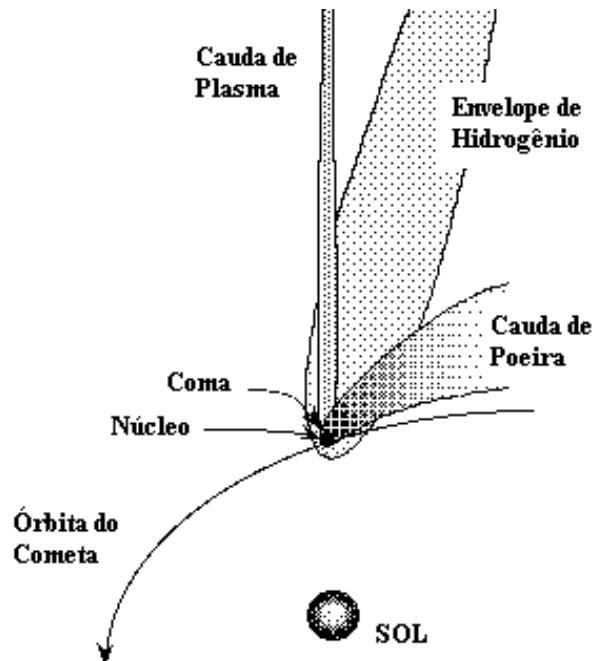
#### A1.1. Estrutura dos Cometas

Quando muito afastados do Sol, os cometas são praticamente invisíveis por serem apenas um núcleo frio. Ao longo de sua jornada, vão se aproximando do Sol e tornam-se núcleos “ativos”, ou seja, passam a brilhar e a apresentar três regiões distintas: núcleo, coma e cauda.

O **núcleo** (com extensões típicas de 1 a 10 km) é o que de fato interage com a radiação e as partículas provenientes do Sol. Sendo a composição básica deste núcleo de materiais voláteis condensados (por exemplo, gelo d’água), gás e grãos de poeira que se encontram agregados à superfície gelada do núcleo desprendem-se do mesmo por sublimação. Este material ejetado forma ao redor do núcleo cometário um “núcleo falso”, denominado **coma** (extensões típicas de  $10^5$  a  $10^6$  km), que em geral mascara a região nuclear. O núcleo e a coma formam o que chamamos de **cabeça do cometa**. A

contínua interação da coma com o vento solar<sup>1</sup> e com a pressão de radiação dá origem a uma **cauda de plasma** e a uma **cauda de poeira**, respectivamente.

A cauda de plasma (extensão típica de  $10^8$  km, podendo atingir de 1 a 2 UA no periélio) possui direção e sentido idênticos aos do vento solar, ou seja, a cauda aponta para uma posição diametralmente oposta a do Sol, a medida que o cometa se desloca em sua órbita. A cauda de poeira (extensão típica de  $10^7$  km) constituída pelos grãos mais pesados ejetados na sublimação nuclear – os quais sofrem uma menor influência da radiação solar – formam um rastro ao longo da órbita do cometa. A evolução dinâmica desta cauda de poeira é que forma os anéis ou feixes de meteoróides.



**Fig.A1.1. Esquema que demonstra as estruturas típicas de um cometa.**

**FONTE:** Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2000).

---

<sup>1</sup> Fluxo tênue de gás e partículas carregadas, principalmente prótons e elétrons, proveniente do Sol.

Pode-se formar ainda um envelope de hidrogênio (extensão típica de  $10^7$  km) ao redor da cabeça do cometa, pelo fato da maior parte do material volátil condensado no núcleo cometário ser, em sua maioria, compostos de hidrogênio (como por exemplo,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{NH}_3$ ). A Figura A1.1 ilustra bem as estruturas anteriormente mencionadas.

### A1.2. Movimentos Orbitais

Os cometas possuem órbitas internas ao sistema solar e orbitam ao redor do Sol segundo a Lei da Gravidade de Sir Isaac Newton. Os principais parâmetros que descrevem a órbita de um cometa são: o semi-eixo maior ( $a$ ); a excentricidade ( $e$ ); a distância mínima ao Sol ou distância periélica ( $q$ ); a inclinação da órbita do cometa ( $i$ ) em relação à eclíptica; o nodo ascendente ( $\Omega$ ), que é o ângulo sobre o plano da eclíptica formado entre o ponto em que o equador celeste intercepta o plano da eclíptica (equinócio vernal) e o ponto equivalente à interseção da órbita do cometa com a eclíptica, no sentido de sul para norte; e o argumento do periélio ( $\omega$ ) que é a orientação do plano da órbita do cometa. A posição da órbita do cometa em relação à eclíptica é definida por  $\Omega$ ,  $\omega$  e  $i$ , enquanto que a forma é definida por  $e$ . Se  $i > 90^\circ$ , o movimento do cometa é dito progressivo (ou direto); se  $i < 90^\circ$ , o movimento é retrógrado.

Há três tipos de órbitas possíveis para um cometa: parabólica ( $e = 1$ ), elíptica ( $0 < e < 1$ ) ou hiperbólica ( $e > 1$ ). De acordo com o tipo de órbita, sabemos se o cometa possui longo ou curto período. Tal período é determinado a partir da 3<sup>a</sup>. Lei de Keppler. Cometas de curto período são os que orbitam o Sol em um ciclo de até 200 anos. Aqueles que transitam em um intervalo acima de 200 anos são ditos de longo período.

### A1.3. Luminosidade dos Cometas

Por definição, o brilho absoluto de um cometa é aquele que este possui quando está à 1 UA tanto do Sol quanto da Terra. Porém, este brilho se altera ao longo de sua órbita. Em geral, a cerca da órbita de Júpiter (aproximadamente 4 UA), o cometa inicia sua

“queima” passando a ser notado visualmente, e tem seu maior brilho na passagem do periélio.

Quando observado da Terra, o cometa pode também sofrer variações em seu brilho aparente por diversos fatores que estão relacionados com o fundo de céu (tais como: condições de transparência da atmosfera, fases da Lua e poluição luminosa das cidades) e com o tipo de técnica de observação utilizada. Contudo, através da observação de alguns cometas, descobriu-se que estes também apresentam uma variação na luminosidade que não depende nem do sítio e nem da instrumentação utilizada nas observações, mas de um mecanismo próprio associado ou com a órbita ou com a estrutura do cometa.

## APÊNDICE 2

### ATMOSFERA TERRESTRE

Os astrônomos sabem que a atmosfera terrestre afeta bastante os sinais eletromagnéticos emitidos por objetos celestes. Para conseguir extrair informações através da radiação recebida por esses corpos o mais próximo possível de sua realidade, é necessário retirar ou evitar os efeitos causados tanto pela composição quanto pela dinâmica da atmosfera.

Nesse sentido, a atmosfera da Terra pode ser considerada uma “barreira” a ser transposta. Contudo, em ciências meteóricas, os astrônomos passam a tratar a atmosfera como uma “aliada” no processo de descrição do comportamento de certos corpos extraterrestres, pois é graças à interação de partículas interplanetárias (meteoróides) com a atmosfera que podemos observar os meteoros e a partir deles inferir uma série de informações não só a respeito de nosso sistema planetário, bem como da própria atmosfera. Por esse motivo, temos interesse em descrever algumas características e propriedades do meio atmosférico.

#### A2.1. Estrutura da Atmosfera

A atmosfera terrestre está em constante movimento como consequência do aquecimento diferencial promovido pela incidência da radiação solar. Esta radiação não é igualmente intensa em diferentes porções da atmosfera. Este aquecimento diferencial aliado a processos de convecção e à rotação da Terra faz com que haja uma estratificação da atmosfera (Tacione, 1988). São quatro as camadas principais que surgem devido a este gradiente de temperatura: a troposfera (0 a 10 km); a estratosfera (10 a 50 km); a mesosfera (50 a 80 km); e a termosfera (acima de 90 km).

A troposfera é a camada que está associada aos fenômenos meteorológicos. Esta camada se caracteriza por apresentar um declive suave em temperatura por altitude ( $\sim 6,5$  K/km). O nível a partir do qual o perfil de temperatura se torna isotérmico é conhecido como **tropopausa**. Esta é a fronteira de transição entre a troposfera e a estratosfera.

Na estratosfera a temperatura é inicialmente constante e logo em seguida começa a subir a medida que a altitude aumenta até o topo desta camada, a **estratopausa** ( $\sim 45$  km de altitude).

Acima da estratosfera está a mesosfera que se caracteriza pela queda de temperatura com a altura. O topo dessa camada é a mesopausa (entre 80 e 85 km de altitude). A partir da mesopausa a atmosfera atinge uma temperatura em torno de 180 K.

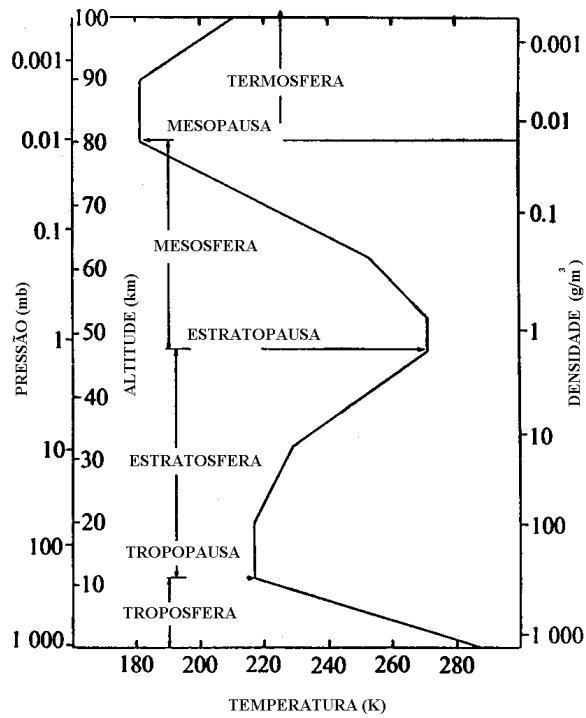
Após a mesopausa inicia-se a termosfera. Esta camada representa o marco de inversão de temperatura, dentro da qual a atmosfera passa a ser dividida por regimes químicos. A **termopausa** é o fim da termosfera a partir da qual há o retorno de um perfil de temperatura isotérmico da atmosfera. A figura A2.1 fornece o perfil de temperatura, pressão e densidade da atmosfera até 100 km de altitude (atmosfera média).

## A2.2. Composição da Atmosfera

Os principais constituintes da atmosfera são o  $N_2$  (78%) e  $O_2$  (21%), cuja proporção entre ambos se mantém a mesma até 100 km de altura. Há outros componentes químicos da atmosfera em menor quantidade, mas que são responsáveis por importantes propriedades da atmosfera.

Moléculas de  $H_2O$ , por exemplo, estão bem concentradas na atmosfera até 3 km de altitude. Acima dessa altura o ar torna-se gradativamente mais seco. Esta componente absorve bastante na faixa do infravermelho e de comprimentos de onda milimétricos.

Outro constituinte importante é o  $CO_2$  (dióxido de carbono). Este é uma fonte absorvedora no infravermelho, sendo mais eficiente no infravermelho médio. Sua distribuição vertical na atmosfera é bem similar àquelas de  $O_2$  e  $N_2$ .



**Fig. A2.1. Perfil de temperatura, pressão e densidade na atmosfera média. Os nomes das camadas estão discriminados de acordo com estes parâmetros, segundo as normas da Organização Mundial de Meteorologia.**

**FONTE:** Lena et al. (1998).

Existe ainda uma forte concentração de O<sub>3</sub> (ozônio) a partir de 16 km de altura, embora possamos detectar tal elemento a 80 km, mas em menores proporções. O ozônio absorve quase 100% da radiação ultravioleta (UV) proveniente do Sol. Assim, a camada de ozônio, também denominada **ozonosfera**, bloqueia essa radiação e consequentemente aquece a estratopausa. Sabe-se hoje que os **clorofluorcarbonetos** são catalisadores de reações químicas que destroem o ozônio. Esses compostos químicos eram muito comuns em *aerosóis* produzidos pelo homem, o que coloca ainda em risco a existência da camada de ozônio.

Por fim, a partir de 60 km de altitude a atmosfera começa a se tornar ionizada devido a processos de foto-ionização do meio em decorrência da incidência de radiação ultravioleta proveniente do Sol. Esta região é conhecida como **ionosfera**. Pelo fato de reações

de recombinação ocorrerem, a densidade eletrônica deste meio não é constante para diferentes altitudes. Dessa forma, a ionosfera é dividida em quatro camadas distintas conforme a densidade local máxima eletrônica do meio (Tabela A2.1).

**TABELA A2.1. Camadas da ionosfera contendo informação sobre a espessura da camada (H), a densidade eletrônica ( $N_e$ ) e a altura de pico de ionização (P).**

*FONTE: Chamberlain (1978).*

Camadas	H (km)	$N_e$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	P (km)
D	60-90	$1,5 \times 10^4$ (tarde) Ausente a noite	90
E	90-140	$1,5 \times 10^5$ (tarde) $< 1,0 \times 10^4$ (noite)	110
F1	140-200	$2,5 \times 10^5$ (tarde) Ausente a noite	200
F2	$> 200$	$10^6$ (tarde) $10^5$ (noite)	300

## APÊNDICE 3

### ASTERÓIDES

Os asteróides provavelmente são parte de resíduos do processo que levou à formação dos planetas. O primeiro a ser descoberto foi Ceres em 1801. Desde então foram observados mais de 100 mil asteróides que, em sua maioria, formam um **cinturão de asteróides** localizado entre as órbitas de Marte e Júpiter. Estes objetos talvez sejam resquícios de um planeta que nunca chegou a se formar. Acredita-se que impedido pela força gravitacional de Júpiter. O estudo de asteróides e cometas, bem como a análise mineralógica de alguns meteoritos encontrados na Terra, são de vital importância para obtermos novas informações sobre o processo de formação do nosso sistema solar.

A maior parte dos asteróides subdivide-se em três categorias principais: os carbonáceos (tipo C), os siliciosos (tipo S) e os metálicos (tipo M). Cerca de 75% dos asteróides conhecidos são do tipo C e localizam-se nas regiões externas do cinturão, sendo também os menos reflexivos, i. e., possuem menor albedo <sup>1</sup>. A maior parte dos demais é do tipo S. Porém, nem todos os asteróides concentram-se no cinturão. Alguns formam grupos distintos e gravitam ao redor do Sol na mesma órbita de Júpiter, como é o caso dos Troianos. Outros seguem órbitas altamente excêntricas, inclusive passando pelo sistema solar interior. Colisões internas e órbitas instáveis podem levá-los para longe do cinturão. Estes corpos são denominados **asteróides potencialmente perigosos** (*Potentially Hazardous Asteroids, PHA*). Em geral são rochas maiores que 100 m, aproximadamente, e que se aproximam do nosso planeta a uma distância menor que 0,05 UA. De acordo com a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e o JPL (*NASA Jet Propulsion Laboratory*) existem mais de 300 PHA devidamente conhecidos. Embora, atualmente, nenhum deles esteja em curso de colisão com o nosso planeta, há sempre a possibilidade de um impacto com a Terra a qualquer momento.

---

<sup>1</sup> Albedo ( $A$ ) é a razão entre a quantidade de radiação solar refletida ( $I_r$ ) e incidente ( $I_i$ ) pela superfície de planetas, satélites naturais ou asteróides:  $A = (I_r / I_i)$ . A quantidade de radiação absorvida ( $I_a$ ) é dada por  $(1-A) I_i$ . Assim, o albedo igual a zero representa absorção total ( $I_a = I_i$ ). Quando igual a um representa reflexão total ( $I_a = 0$ ).



## APÊNDICE 4

### ATRAÇÃO GRAVITACIONAL

Uma partícula de massa  $m$  com órbita elíptica ao redor da Terra com massa  $M_T \gg m$ , tem sua energia total  $E$  dada por:

$$E = \frac{L^2}{2d^2m} \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon^2} \right) \quad (\text{A4.1})$$

Sendo,

$L$  – momento angular da partícula;

$d$  – distância do perigeo da órbita da partícula;

$\varepsilon$  - excentricidade da órbita da partícula.

Como a energia total desse sistema pode ser expressa como a soma da energia cinética com a energia potencial gravitacional:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + \left( -G \frac{M_T m}{r} \right) \quad (\text{A4.2})$$

Sendo,

$m$  – massa da partícula;

$v$  – velocidade orbital da partícula;

$M_T$  – Massa da Terra;

$G$  – constante gravitacional;

$r$  – distância da partícula à Terra

Então, substituindo (A4.1) em (A4.2), temos:

$$\frac{1}{2}mv^2 - G \frac{M_T m}{r} = \frac{L^2}{2d^2m} \left( \frac{\varepsilon^2 - 1}{\varepsilon^2} \right) \quad (\text{A4.3})$$

Sendo o semi-eixo maior  $a$  da órbita elíptica da partícula dado por:

$$a = \frac{d\varepsilon}{1-\varepsilon^2} \quad (\text{A4.4})$$

Então,

$$\frac{\varepsilon^2 - 1}{\varepsilon^2} = -\frac{d}{a\varepsilon} \quad (\text{A4.5})$$

Substituindo (A4.5) em (A4.3), temos:

$$\frac{1}{2}mv^2 - G\frac{M_T m}{r} = -\frac{L^2}{2am\varepsilon} \quad (\text{A4.6})$$

Lembrando que a energia potencial  $E_p$  de uma partícula sob a ação de uma força central pode ser expressa por:

$$E_p = -\frac{L^2}{md\varepsilon} \quad (\text{A4.7})$$

Então,

$$\begin{aligned} E_p &= -G\frac{M_T m}{r} = -\frac{L^2}{md\varepsilon} \therefore \\ \frac{L^2}{md\varepsilon} &= GM_T m \end{aligned} \quad (\text{A4.8})$$

Portanto, substituindo (A4.8) em (A4.6), encontramos a seguinte expressão para a velocidade orbital da partícula:

$$v^2 = GM_T \left( \frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right) \quad (\text{A4.9})$$

## APÊNDICE 5

### MECANISMOS DE ABLAÇÃO

O modelo de ablação apresentado (Jones & Kaiser 1966) é uma generalização da teoria clássica para incluir os efeitos de **radiação térmica, condutividade térmica e capacidade calorífica** dos meteoros. A taxa de transferência de calor  $Q$ , para um meteoróide, é dada por:

$$Q = \frac{1}{2} \Lambda \rho_a V^3 A \quad (\text{A5.1})$$

Sendo,

$\Lambda$  – coeficiente de transmissão de calor;

$A$  – área do meteoróide projetada;

$V$  – velocidade do meteoróide;

$\rho_a$  – densidade do ar.

Enquanto a temperatura superficial  $T_s$  de um meteoróide for menor que a temperatura de fusão  $T_f$  do material de que é composto, o calor transferido ao mesmo será dissipado por radiação ou condução térmica. Se considerarmos um meteoróide esférico, este processo de transferência calorífica pode ser expresso como:

$$Q = 4\epsilon\sigma A(T_s^4 - T_{amb}^4) + \frac{4}{3} AR\rho_m c \frac{dT_m}{dt} \quad (\text{A5.2})$$

Sendo,

$\epsilon$  – emissividade da superfície;

$\sigma$  – constante de Stefan

$T_s$  – temperatura superficial do meteoróide;

$T_{amb}$  – temperatura ambiente;

$dT_m/dt$  – taxa de variação da temperatura média ( $T_m$ ) do meteoróide;

$c$  – calor específico da substância do meteoróide;

A primeira parcela do lado direito da Equação (A5.2) é o termo de radiação térmica, enquanto o segundo termo representa a condutividade térmica.

Segundo Jones & Kaiser (1966), quanto menor for o tamanho de uma partícula, mais eficiente é o processo de radiação térmica. Neste caso, a condutividade térmica no interior destas partículas pode ser desprezada. Assim, quando a temperatura superficial do meteoróide atingir a temperatura de fusão, inicia-se sua ablação (ou evaporação) que ocorre quando a densidade do ar  $\rho_{ar}$  for igual a uma certa densidade característica  $\rho_{rad}$ .

Neste caso, para determinarmos a densidade mínima ( $\rho_{rad}$ ) para a qual um meteoróide de pequenas dimensões com velocidade  $V$  inicia sua ablação, substituímos a Equação (A5.1) em (A5.2) e ignoramos o termo de condutividade da Equação (A5.2), logo:

$$\frac{1}{2} \Lambda \rho_a V^3 = 4 \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{amb}^4)$$

Com  $T_{amb} \ll T_f$ :

$$\rho_{rad} = \frac{8 \varepsilon \sigma}{\Lambda V^3} T_f^4 \quad (A5.3)$$

Assumindo que  $\Lambda = 1$ ,  $\varepsilon = 1$ ,  $T_f = 2100$  K (Öpik, 1958) e  $\sigma = 5,67 \times 10^{-5}$  erg  $^{\circ}\text{K}^4 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ , então:

$$\rho_{rad} = 8,8 \times 10^9 V^{-3} \quad (A5.4)$$

Pela Equação (A5.4) notamos que a densidade de ar mínima para o início da ablação de um meteoróide de raio pequeno é inversamente proporcional ao cubo da velocidade do meteoróide. Concluímos daí que quanto maior for a velocidade de entrada de uma partícula, mais rarefeita é a densidade do ar (altas altitudes) onde ocorre o início de sua evaporação. O inverso acontece para partículas com velocidades menores em que a evaporação tem início em baixas altitudes (maior densidade atmosférica).

Pelo mesmo modelo proposto por Jones & Kaiser (1966), quando consideramos meteoróides com grandes raios, o processo de ablação destas partículas passa a ser dominado pelo processo de condutividade térmica. Neste caso a equação de transferência de calor pode ser escrita como:

$$\frac{1}{2} \Lambda \rho_a V^3 = \frac{4}{3} R \rho_m c \frac{dT_m}{dt} \quad (\text{A5.5})$$

Sendo  $R$  = raio do meteoróide e  $\rho_m$  = densidade média do meteoróide. Assumindo uma atmosfera isotérmica em que a densidade do ar pode ser expressa aproximadamente como:

$$\rho_a \propto \exp(-h/H),$$

com  $H$  = escala de altura atmosférica e  $h$  = altura na atmosfera, podemos integrar a Equação (A5.5) em função do tempo a fim de obtermos:

$$\rho_a V^2 \left( \frac{H}{\cos \chi} \right) = \frac{8}{3} \frac{R \rho_m c}{\Lambda} \frac{d(T_m - T_{amb})}{dt}$$

Logo, com  $T_m = T_f$

$$\rho_a = \frac{8 R c \rho_m (T_f - T_{amb})}{3 \Lambda H V^2} \cos \chi \quad (\text{A5.6})$$

Sendo  $\chi$  a distância zenital do meteoróide. Assumindo  $c = 10^7 \text{ erg g}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$  (Öpik, 1958),  $\Lambda = 1$ ;  $H = 7 \times 10^5 \text{ cm}$  (escala de altura média);  $\rho_m = 4 \text{ g cm}^{-3}$  (densidade média do meteoróide);  $T_m = T_f = 2100 \text{ K}$  e  $T_{amb} = 200 \text{ K}$ ; obtemos a partir da Equação (A5.6) a densidade do ar  $\rho_{cond}$  na qual se inicia a ablação destas partículas de raios maiores:

$$\rho_{cond} = 2,9 \times 10^5 R V^{-2} \cos \chi \quad (\text{A5.7})$$

Se compararmos as Equações (A5.4) e (A5.7), verificamos que partículas com uma mesma velocidade porém com diferentes raios irão evaporar em camadas distintas da atmosfera. A densidade do ar  $\rho_{rad}$  cai mais rapidamente com a velocidade do que  $\rho_{cond}$ .

Define-se um raio crítico  $R_c$  em relação ao qual determinamos que tipo de processo irá governar a evaporação de um meteoróide. Se o raio do meteoróide for menor que  $R_c$ , o processo de radiação térmica é quem domina (partículas com pequenas dimensões). Caso o meteoróide possua um raio maior que  $R_c$ , então é a condutividade térmica que irá comandar o processo de ablação (partículas com grandes dimensões). Uma expressão para  $R_c$  pode ser obtida quando  $\rho_{rad} = \rho_{cond}$  (caso limite de densidades).

$$R_c = \frac{3 \times 10^4}{V \cos \chi} \quad (\text{A5.8})$$

Por exemplo, para um meteoróide com velocidade de 30 km/s cuja distância zenithal  $\chi$  seja  $0^\circ$  (ou seja,  $\cos \chi = 1$ ), o raio crítico será de 0,01 cm.

Apenas meteoróides com raios  $R < R_c$  sofrem uma desaceleração significativa durante o processo de ablação (Jones & Kaiser, 1966). No processo de colisões, o meteoróide irá diminuir seu momento linear ao interagir com o ar. Decorrido um tempo  $dt$  a massa de ar interceptada pelo meteoróide ( $dm_a$ ) em um certo volume será:

$$dm_a = S \rho_a V dt \quad (\text{A5.9})$$

Sendo,

$V$  – velocidade do meteoróide

$\rho_a$  – densidade do ar

$S = \pi R^2$  – seção de choque de um meteoróide esférico

Estas partículas do ar ganham, nesse processo, uma quantidade de momento por segundo dada por:

$$\Gamma \frac{d}{dt}(m_a V) = \Gamma V \frac{dm_a}{dt} \quad (\text{A5.10})$$

Sendo  $\Gamma$  é uma quantidade adimensional denominada por **coeficiente de arraste**, o qual depende apenas da forma do meteoróide.

Por sua vez, o meteoróide irá **perder** nesse processo uma certa quantidade de momento por segundo  $\left(m \frac{dV}{dt}\right)$ . Por conservação, esta quantidade de momento perdida é exatamente igual àquela fornecida para as partículas do ar, portanto:

$$-m \frac{dV}{dt} = \Gamma V \frac{dm_a}{dt} \quad (\text{A5.11})$$

Aplicando (A5.9) em (A5.11), temos:

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{3\Gamma\rho_a V^2}{4R\rho_m} \quad (\text{A5.12})$$

A Equação (A5.12) é conhecida como **equação de arraste**. Podemos observar que o arraste ou desaceleração sofrida por um corpo que penetra a atmosfera aumenta quanto maior for sua velocidade ou quanto mais denso for o meio que este corpo atravessa.

Em uma atmosfera isotérmica, podemos integrar a Equação (A5.12) a fim de obtermos uma expressão para  $V$ :

$$V = V_\infty \exp\left(-\frac{3H\Gamma\rho_a}{4R\rho_m \cos \chi}\right) \quad (\text{A5.13})$$

Sendo  $V_\infty$  a velocidade do meteoróide antes de penetrar na atmosfera. Substituindo (A5.13) em (A5.2), desprezando o termo de condutividade térmica (caso de pequenas partículas), temos:

$$(T_s^4 - T_{amb}^4) = \frac{\Lambda \rho_a V_\infty^3}{8 \varepsilon \sigma} \exp\left(-\frac{9H\Gamma \rho_a}{4R \rho_m \cos \chi}\right) \quad (A5.14)$$

Fazendo  $T_s = T_f$  e sabendo que  $T_{amb} \ll T_f$ , aplicamos (A5.3) em (A5.14) para obter uma outra expressão para  $\rho_{rad}$ :

$$\rho_{rad} = \rho_a \exp\left(-\frac{9H\Gamma \rho_a}{4R \rho_m \cos \chi}\right) \quad (A5.15)$$

Explicitando o raio do meteoróide  $R$  a partir da Equação (A5.15), temos:

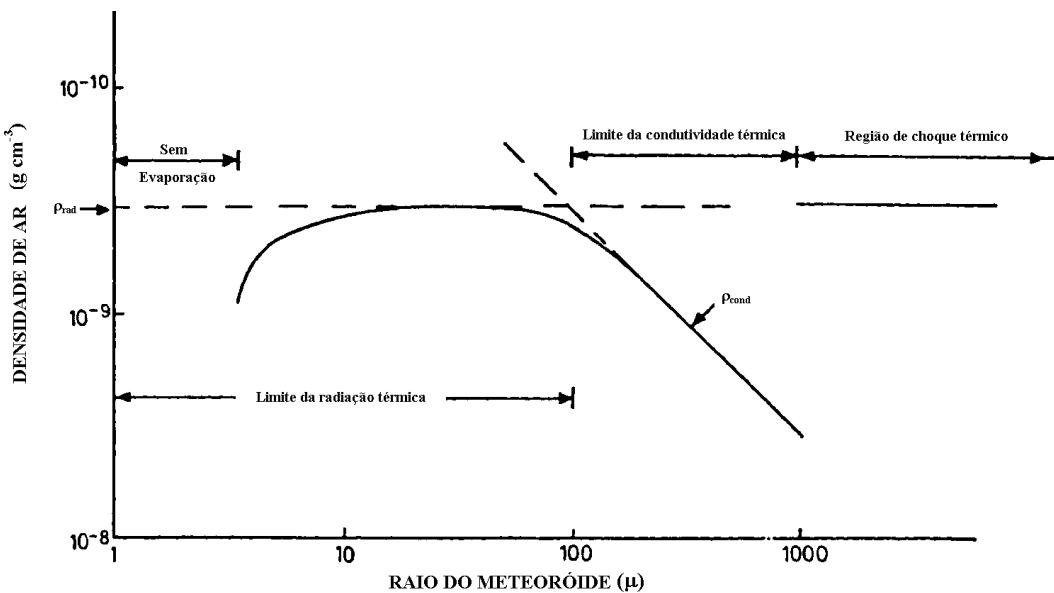
$$R = \frac{9H\Gamma \rho_a}{4 \rho_m \cos \chi \ln(\rho_a / \rho_{rad})}; \quad R < R_c \quad (A5.16)$$

A Figura A5.1 mostra a curva gerada pelas Equações (A5.7) e (A5.16), aplicando-se os valores dos parâmetros listados na Tabela A5.1.

**TABELA A5.1. Valores de parâmetros utilizados para o cálculo das Equações (A5.7) e (A5.16) para gerar o gráfico da Figura (A5.1).**

**FONTE: Jones & Kaiser (1966).**

$V_\infty$ (cm/s)	$\cos \chi$	$\langle H \rangle$ (cm)	$\Gamma$	$\rho_m$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{rad}$ (g/cm <sup>3</sup> )
$30 \times 10^5$	1	$7 \times 10^5$	1	4	3,26

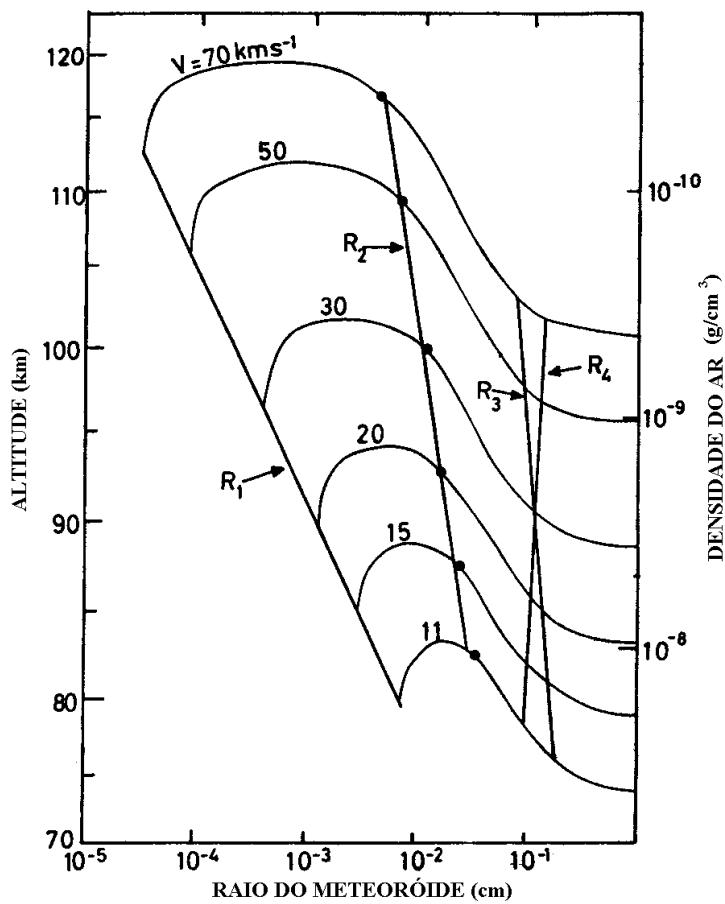


**Fig.A5.1. Gráfico contendo os valores teóricos das densidades de ar em que se iniciam os processos de ablação em função dos raios de meteoróides. São apresentados os limites de cada mecanismo que atua sobre os meteoróides de acordo com seus raios. Esta curva é válida para meteoróides com velocidades de 30 km/s.**

**FONTE:** Jones & Kaiser (1966).

Observamos pela Figura A5.1 que se fixarmos a velocidade dos meteoróides, a densidade de ar inicial de evaporação das partículas varia de acordo com o raio da partícula. O regime de radiação térmica atua em partículas com  $R < R_c$  em regiões de baixa densidade atmosférica. Isto significa que quanto menor for o raio da partícula, seu estágio de ablação tem início em altas altitudes. Já o regime de condutividade térmica atua em partículas com  $R > R_c$ , em regiões nas quais a densidade atmosférica é maior. Neste caso, quanto maior for o raio das partículas menor será a altitude inicial de evaporação das mesmas. Cabe ainda destacar a existência de dois regimes extremos: um no qual não há a evaporação de partículas (micrometeoróides) e um outro em que o aquecimento das partículas ocorre por choque térmico. Estes regimes são descritos com outros detalhes a seguir.

A Figura A5.2 representa um gráfico semelhante ao da Figura A5.1, porém um pouco mais geral porque correlaciona as alturas e densidades de ar nas quais meteoróides com diferentes raios e velocidades iniciam sua ablação. Por este gráfico existem quatro raios críticos que separam distintos processos de ablação (Jones & Kaiser, 1966; Kaiser & Jones, 1968), que são equivalentes aos regimes destacados na Figura A5.1 (Jones & Kaiser, 1966). O raio  $R_1$  é o limite de micrometeoróides. Partículas menores que este raio não evaporam. Partículas com raios entre  $R_1$  e  $R_2$  (raio limite para meteoros com magnitude +10) têm o processo de ablação governado pela radiação térmica, i.e., as pequenas partículas aquecem rapidamente suas superfícies, atingindo quase que instantaneamente o ponto de fusão antes que qualquer calor seja transmitido para seus interiores, e por isso queimam mais alto. Aquelas partículas com raios entre  $R_2$  e  $R_3$  têm uma ablação governada por uma condutividade térmica finita, ou seja, tais partículas levam um certo tempo para absorver e aquecer os seus interiores para que se tenha início ao processo de ablação. Se os raios forem maiores que  $R_3$ , as partículas desenvolvem em seu interior um gradiente de temperatura que promove a fragmentação de suas estruturas. Os fragmentos produzidos são espalhados livremente pelo meio atmosférico. A energia recebida por estes fragmentos pela colisão com as moléculas do ar aumenta quase que instantaneamente, produzindo um aumento de brilho súbito na trilha de meteoro observada. Contudo, uma progressiva fragmentação continua a ocorrer até que os fragmentos são pequenos o suficiente para que um severo regime de choque térmico se estabeleça.



**Fig.A5.2.** Gráfico contendo os valores teóricos de alturas e densidades de ar nas quais meteoróides com diferentes raios e velocidades iniciam sua ablação. São ilustrados os quatro raios críticos que governam os processos de ablação de diferentes tipos de meteoróides.

**FONTE:** Hughes (1978).

Por fim, notamos ainda pela Figura A5.2 que se fixarmos o raio dos meteoróides, o processo de ablação dos mesmos tem início em altitudes cada vez mais altas (densidade de ar rarefeita) à medida que caminhamos para velocidades maiores.