

## 10 Conclusão

Esta tese teve por objetivo realizar um estudo radiometeorológico na região Amazônica utilizando dados provenientes de uma rede de pluviógrafos, instalada na região com este propósito, e dos radares meteorológicos do SIPAM. A baixa densidade populacional da região, com a floresta cobrindo uma parte significativa da mesma, evidencia a importância dos sistemas de comunicações via satélite como o meio mais adequado para interligar cidades e vilarejos e facilitar a defesa e a manutenção da soberania e da integridade territorial da região, diretamente relacionado ao conceito de segurança nacional.

Considerando que devido ao congestionamento do espectro, tais sistemas estão migrando cada vez para as faixas de frequência acima de 10 GHz, o estudo aqui desenvolvido foi motivado pela necessidade de se investigar o efeito da precipitação pluviométrica na propagação de sinais de satélites que operam nas bandas Ku e Ka. Adicionalmente, cumpre assinalar que a quantidade limitada de dados meteorológicos e de atenuação por chuva atualmente existente na região equatorial, dificulta sobremaneira o dimensionamento dos sistemas a serem implementados.

Uma rede de pluviógrafos, do tipo caçamba basculante, foi implementada com a finalidade de possibilitar o levantamento de dados pontuais em oito localidades, escolhidas criteriosamente de forma a caracterizar as peculiaridades do clima da região. Outro fator levado em conta nesta escolha, foi a localização dos radares meteorológicos do SIPAM. Há disponibilidade de radar em todos os pontos onde foram instalados os pluviógrafos. Por problemas de conexão com Manaus, não foi possível coletar os dados do radar de Belém. Adicionalmente, a pesquisa contou ainda com os dados do radar de Tefé, onde não foram feitas medidas pontuais da precipitação.

Foi levantada e processada uma quantidade razoável de dados experimentais provenientes dos pluviógrafos e dos radares meteorológicos cobrindo o período de um ano. Em síntese, a partir dos resultados da análise realizada foi possível

determinar as distribuições estatísticas cumulativas da taxa de precipitação (anual e pior mês) para todas as localidades com pluviógrafos em operação, investigar o comportamento dinâmico da chuva, estabelecer a relação entre Z (refletividade do radar) e R (precipitação) e caracterizar a estrutura espacial da chuva na região equatorial. Detalhando tais resultados, será apresentada a seguir as principais conclusões do trabalho realizado:

a) Distribuição cumulativa estatística da taxa de precipitação – pelos motivos expostos no texto, foi adotada na análise a classificação de Köppen, através da qual, identifica-se na região três subtipos climáticos: Af, Am e Aw. Praticamente, não foram observadas diferenças significativas entre os subtipos Af e Am relativamente às distribuições estatísticas (anual e pior mês). No que diz respeito ao subtipo Aw, a diferença é marcante na distribuição anual, havendo razoável concordância no que diz respeito ao pior mês. Verifica-se, porém, que existem variações mensais e diárias na distribuição das chuva, cujo conhecimento pode ser útil no dimensionamento de dispositivos para o controle de potência das estações terrenas. Adicionalmente, vale acrescentar que a classificação de Köppen é uma ferramenta que pode ser utilizada na extrapolação de resultados para outras regiões de clima similar;

b) Modelos de distribuição estatística – os dados experimentais dos pluviógrafos foram comparados com as funções de Paraboni [40], Salonen e Baptista [42] e Moupfouma [47], assim como com funções associadas às distribuições de Weibull e log-normal. Exceto no que diz respeito às distribuições log-normal e de Weibull com dois parâmetro, todas as demais apresentaram desempenho equivalente. Houve, no entanto, uma ligeira supremacia do modelo de Paraboni. Apesar deste resultado, adotou-se como referência nesta tese o modelo de Salonen e Baptista que, além de constituir a base da Recomendação UIT-R P.834, tem a vantagem de depender de dados usualmente disponíveis em estações meteorológicas. Nesta linha, demonstrou-se a possibilidade de aprimorar o desempenho da citada Recomendação na Amazônia através do emprego de dados meteorológicos locais;

c) Comportamento dinâmico da precipitação – neste tópico foi dada ênfase à análise da duração e do número de eventos com chuva. Observou-se, como seria

de esperar com base em resultados anteriores, que o subtipo climático Aw é o que apresenta o menor número de eventos para uma determinada intensidade de chuva. Entretanto, no que diz respeito à duração média dos eventos, verificou-se que, independentemente do subtipo climático, os mais longos estão concentrados no intervalo entre 20 e 70 mm/h, com um máximo no entorno de 30 mm/h. É importante ressaltar que o dimensionamento de sistemas com baixa disponibilidade tem por referência a taxa de precipitação ultrapassada entre 1 e 0,1% do pior mês [14]. As curvas de distribuição cumulativa para o pior mês apresentadas no Capítulo 3 mostram que para as citadas percentagens, as taxas de precipitação correspondentes situam-se entre 20 e 100 mm/h, superpondo-se ao intervalo dos eventos mais longos. Este resultado é importante e deve ser levado em conta no projeto de técnicas de melhoria, tais como, códigos corretores de erro, controle de potência do enlace de subida, etc.;

d) Relação Z-R – a análise desta relação foi feita com base em dois métodos, designados no texto por absoluto e relativo. Embora com diferentes valores de a e b na relação  $Z = a.R^b$ , os resultados obtidos pela aplicação dos métodos foram essencialmente os mesmos, indicando que ambos são adequados. A preferência pelo método absoluto prendeu-se ao fato deste método ter apresentado um resultado ligeiramente mais próximo das medidas. Isto porque trabalha diretamente com a distribuição estatística da refletividade, prescindindo de um ajuste a partir de uma relação pré-determinada entre Z e R, o que é feito no método relativo. O erro introduzido pro este ajuste no método relativo constitui uma provável fonte de erro. Por outro lado, a clássica relação de Marshall e Palmer ( $Z = 200R^{1.6}$ ), não se mostrou adequada para o clima equatorial. Finalizando, cumpre ressaltar que os melhores resultados na comparação entre valores medidos e calculados através da relação Z-R foram conseguidos ajustando-se os valores de Z com dois segmentos de reta separados por um ponto de quebra em 50 mm/h. Há evidência de que este ponto de quebra esteja relacionado à separação entre chuva estratiforme e chuva convectiva, entretanto, não houve aprofundamento desta questão por estar fora do escopo do trabalho;

e) Estrutura espacial da precipitação – sem dúvida alguma, é neste item que os dados do radar meteorológico são extremamente úteis. Através do monitor do

radar tem-se uma visualização detalhada da distribuição espacial da chuva, tanto no plano horizontal, como no plano vertical. Na análise desenvolvida no Capítulo 8, visando aprofundar o conhecimento sobre a estrutura horizontal da precipitação, foram utilizados os dois métodos citados anteriormente com um ou dois segmentos. O método absoluto com dois segmentos foi tomado como padrão de comparação. No contexto dos resultados obtidos no Capítulo 8, traduzidos através de tabelas e curvas, destacam-se a expressão que define matematicamente a dimensão da célula (8.3) e o estudo estatístico que permite estimar a percentagem de tempo que uma taxa de precipitação é excedida em dois pontos separados por uma determinada distância. Este estudo pode servir de base para analisar o problema da separação mínima entre estações terrenas em um sistema de comunicações por satélite que emprega a técnica de diversidade de sítio. Ainda no que se refere à estrutura espacial da chuva, resta comentar a distribuição vertical tratada no Capítulo 9. Como seria de esperar, os perfis verticais mostraram-se similares aos obtidos por outros autores em chuvas convectivas. Evidenciou-se, mais uma vez, que o uso da isoterma de  $0^{\circ}\text{C}$  não é a referência mais adequada para definir a altura da chuva em clima equatorial. Entretanto, uma investigação mais detalhada desta questão foi deixada para ser pesquisada posteriormente. Como informação adicional, o Capítulo 9 apresenta ainda os dados relativos a um evento excepcional observado no radar de Tefé. Neste evento, a distribuição horizontal da chuva abrange uma área ampla, com um diâmetro muito superior ao definido pela expressão (8.3). Por outro lado, no que diz respeito à variação com a altura, valores elevados da taxa de precipitação estendem-se até da ordem de 9 km, muito acima da isoterma de  $0^{\circ}\text{C}$ .

## 10.1

### Sugestões de trabalhos futuros

Apesar da abrangência desta tese, não se tem a pretensão de que o assunto esteja esgotado. Existem ainda dados experimentais a serem processados e aspectos teóricos a serem explorados em trabalhos futuros. Neste sentido, alguns tópicos relevantes estão relacionados a seguir.

a) Recomendação UIT-R P.834 – é possível tornar esta Recomendação mais precisa para regiões equatoriais através do aprimoramento do banco de dados que lhe serve de apoio. Para isto, deve-se tomar por referência o estudo realizado no Capítulo 5 e ampliar os dados disponíveis com informações provenientes de outras regiões equatoriais do globo. Neste particular, a classificação de Köppen pode ser útil para servir de base para extrapolação de dados entre regiões equatoriais distintas. Uma vez conseguida uma quantidade adequada de medições, será então possível reformular as matrizes do banco de dados da citada Recomendação;

b) Comportamento dinâmico da precipitação – foi apenas indicada a aplicação dos resultados obtidos. Seria recomendável desenvolver mais este item, com um estudo mais detalhado sobre a dependência das técnicas de melhoria comentadas no texto com a duração e incidência de eventos de chuva;

c) Relação Z-R – investigar o ponto de quebra em 50 mm/h e sua relação com a separação entre chuva estratiforme e chuva convectiva. Aprofundar o estudo no sentido de verificar a possibilidade de se chegar a valores de  $\underline{a}$  e  $\underline{b}$  que tenham, dentro de uma margem de erro aceitável, um caráter universal para o clima equatorial;

d) Estrutura espacial da chuva – utilizar os resultados dos Capítulos 8 e 9 com a finalidade de modelar o cálculo da atenuação por chuva em enlaces terrestres e espaciais. Estudo similar poderá ser feito para analisar a atenuação em enlaces concorrentes e em sistemas com diversidade de sítio.