

7.1.**Conclusões**

Neste trabalho foi estudado o problema da dinâmica da atenuação aplicado a dados resultantes de 28 anos-sítio, sendo 7 de enlaces via satélite e 21 de enlaces terrestres, localizados entre -1 e -30 graus de latitude. A dinâmica da atenuação compreende os estudos estatísticos da taxa de variação da atenuação e da duração e número de eventos. Além do banco de dados de resultados em climas tropicais criado, um estudo combinado de enlaces satélite e terrestre não existe, tanto quanto foi possível apurar, na literatura. Estes resultados constituem-se assim em uma contribuição original desta tese a um assunto que tem se tornado cada vez mais importante para a União Internacional de Telecomunicações (UIT).

Os capítulos 1, 2 e 3 foram dedicados a apresentação do problema, dos principais modelos em aplicação, do aparato experimental e dos procedimentos de pré-processamento dos dados. Entre os procedimentos de pré-processamento estão filtragens de cintilação (com a escolha adequada de banda e tipo de filtro) e preparação das séries temporais da taxa de variação da atenuação. Esta discussão preliminar é de grande relevância, uma vez que gera insumos para a padronização do banco de dados da UIT, que ora se trabalha.

Nos capítulos 4 e 5 foi discutida a estimação paramétrica da função densidade de probabilidade das taxas de variação da atenuação e o modelo geoclimático de predição dos parâmetros. As densidades obtidas de enlaces satélite apresentaram um nível de multimodalidade que se mostrou crescente com a atenuação. Os motivos para o aparecimento dos múltiplos modos podem ser uma combinação de efeitos de diferentes tipos de chuvas, bem como uma limitação do estimador, cuja tendenciosidade estatística é inversamente proporcional ao número de pontos usados na criação da curva de densidade (a qual diminui com o limiar de atenuação).

Já os resultados para os enlaces terrestres apresentaram um comportamento bem mais uniforme e com menor número de modos. A razão para este comportamento pode estar ligada ao fato dos enlaces estarem sujeitos apenas às variações da distribuição espacial da chuva no plano horizontal, enquanto que os enlaces via satélite sofrem também o efeito de variações verticais, que podem ser intensas no caso de chuvas convectivas.

As densidades empíricas apresentaram um alto nível de curtose, com uma grande concentração de pontos perto da média, o que concorda com resultados obtidos por outros autores. No entanto, uma análise especial comparativa mostrou que o modelo de Van de Kamp, utilizado largamente para o modelamento da taxa de variação da atenuação, não se aplica aos resultados por não contemplar multimodalidade.

A estimação paramétrica das densidades empíricas de probabilidade não mostrou diferenças entre os resultados obtidos de enlaces satélite e terrestre. A comparação entre a densidade gaussiana e a densidade lorentziana (caracteristicamente leptocúrtica) mostrou que a hipótese gaussiana é estatisticamente melhor dentro da faixa de valores de atenuação excedidos usada no estudo. Nesta abordagem, a simplicidade da gaussiana foi preferida em detrimento de uma mistura de densidades, que seriam teoricamente melhores para se representar densidades multimodais. Sugere-se, em trabalhos futuros, que esta hipótese seja tentada. Neste trabalho, as vantagens do uso da gaussiana, principalmente no que diz respeito ao problema do cruzamento de níveis, foram decisivas na escolha desta para representar a densidade da taxa de variação da atenuação.

O capítulo 5 descreveu os detalhes da construção do modelo geoclimático para a estimação dos parâmetros da densidade gaussiana (média e desvio padrão). Desta análise resultaram dois modelos: um para dados satélite baseado em latitude, longitude, altitude e atenuação excedida, e outro para enlaces terrestres baseado em frequência, distância e atenuação excedida. Análises de correlação entre as variáveis independentes mostrou que um modelo cooperativo multivariável era a melhor opção analítica em ambos os casos. O modelo escolhido foi uma regressão do tipo “piecewise linear”, o qual, apesar do nome, é um modelo não linear. Foram obtidos valores elevados de variância explicada, corroborando a qualidade dos modelos.

Apesar do bom desempenho dos modelos obtidos, seria importante, em futuros trabalhos, a extensão para um número maior de enlaces, advindos de resultados do banco de dados da UIT, o que ampliaria a validade do presente modelo.

O capítulo 6 apresentou os resultados para a caracterização e modelamento geoclimático da distribuição de tempo de duração de eventos de atenuação para os enlaces satélite e caracterização paramétrica da curva de grau de indisponibilidade para os enlaces terrestres de São Paulo.

Para a distribuição do tempo de duração de eventos foram testadas 4 hipóteses. Duas destas, Lognormal e Exponencial de 2ª ordem representam modelos já em uso e as outras 2, Weibull e Riscos Lineares, representam opções sugeridas por este trabalho. O processo de comparação foi baseado no desempenho de cada hipótese no ajuste das curvas empíricas. Verifica-se que as duas melhores hipóteses eram Weibull e Exponencial de 2ª ordem. Como a hipótese Weibull possui um número menor de parâmetros, esta é estatisticamente melhor. Por outro lado, a discretização da tabela do banco de dados da UIT, da qual as curvas empíricas usadas neste trabalho foram tiradas, não permite uma análise mais detalhada, possivelmente utilizando misturas de distribuições para representar o conjunto de efeitos das baixas, médias e longas durações. Assim, como sugestão para trabalhos futuros, fica a construção de curvas de distribuição empírica com um maior número de durações.

Um modelo geoclimático do mesmo tipo usado para estimar os parâmetros da distribuição gaussiana no capítulo 5 foi desenvolvido para a estimação dos parâmetros da distribuição Weibull. O ajuste obtido foi considerado bom, mas poderia ser melhorado com uma maior discretização das curvas de distribuição empírica.

A análise do grau de indisponibilidade apresentou os primeiros resultados de um estudo mais amplo ainda em andamento para caracterização deste parâmetro. Sendo um campo novo, não há, tanto quanto se pôde apurar, resultados na literatura com os quais comparar os obtidos neste trabalho. Curvas exponenciais de 1ª, 2ª e 3ª ordem foram ajustadas às curvas empíricas. Os ajustes de 2ª e 3ª ordem se mostraram equivalentes e melhores que o de 1ª ordem. Desta maneira, o ajuste de 2ª ordem foi escolhido como a melhor hipótese de modelo. A existência de um enlace operando em duas frequências diferentes (15 e 18 GHz)

permitiu uma avaliação do escalonamento em frequência do grau de indisponibilidade. Comparando-se as duas curvas, verifica-se que a curva para 18 GHz tem valores do número de eventos de atenuação excedida com duração acima de 10s com 1,18 vezes maior que a curva para 15 GHz. Este é um resultado preliminar. Para se obter uma curva de escalonamento de frequências, será necessário ampliar o número de enlaces e de frequências, o que fica como sugestão para um futuro trabalho.

7.2. Sugestões para trabalhos futuros

Os estudos realizados nesta tese levantaram uma série de questões que podem ser exploradas em trabalhos futuros sobre a dinâmica da atenuação por chuvas em enlaces terrestres e via satélite.

Os modelos desenvolvidos neste trabalho são puramente empíricos. Idealmente, seria desejável obter modelos gerais para a distribuição espacial e temporal dos campos de chuva, que permitissem o cálculo da atenuação e a previsão de sua dinâmica a partir da taxa de precipitação. Este é, certamente, um problema de alta complexidade mas que começa a se vislumbrar como viável com a crescente disponibilidade de dados de medidas com radares e de sensoriamento remoto por satélites com cobertura em regiões tropicais.

Considerando que, de qualquer forma, por muitos anos, os modelos empíricos serão os mais viáveis e os mais utilizados, é fundamental a continuidade das campanhas de medidas e sua extensão para um número maior de locais, no Brasil e em todo o mundo. Isto permitirá a melhoria da precisão e a extensão dos modelos locais aqui desenvolvidos para outras regiões e o eventual desenvolvimento de um modelo global a ser recomendado pelo ITU-R.

Uma aplicação natural e imediata dos resultados aqui obtidos é o desenvolvimento de algoritmos e ferramentas para a simulação de eventos de atenuação por chuvas e geração de séries temporais, com aplicações ao desenvolvimento de sistemas de controle automático de potência.

Finalmente, a continuidade da modelagem e desenvolvimento de métodos de previsão do grau de indisponibilidade, apenas iniciados neste trabalho, é de grande importância uma vez que, recentemente, a UIT-T definiu este parâmetro como requisito de desempenho para o projeto de enlaces rádio digitais.