

Análise da Variação Espacial da Taxa de Precipitação com Aplicação em Diversidade de Sítio para Enlaces Terra-Satélite

Jorge L. Cerqueira¹, Mauro S. Assis², L.A.R. da Silva Mello³

Resumo—Este trabalho analisa a variação espacial da taxa de precipitação na região Amazônica. Foram utilizadas medidas de um radar meteorológico localizado Cruzeiro do Sul, AC, e desenvolvido um modelo matemático relacionando a distribuição estatística da chuva entre dois pontos separados por uma determinada distância. Adicionalmente, no estabelecimento da relação entre refletividade do radar e taxa de precipitação, dados provenientes de um pluviógrafo instalado nas vizinhanças do radar foram levados em conta. Os resultados finais do trabalho mostraram-se compatíveis com a forma de variação observada nas curvas de ganho da diversidade de sítio obtidas a partir de modelos empíricos com base na atenuação do sinal.

Palavras-Chave— taxa de precipitação, diversidade de sítio, região Amazônica, radar meteorológico, radiometeorologia,

Abstract—This paper deals with the spatial variability of rain rate in the Amazon region. Measurements from a meteorological radar located in Cruzeiro do Sul, AC, were taken into account and a mathematical model for relating the statistical distribution of precipitation rate between two points separated by a given distance was developed. Additionally, data from a pluviograph installed near the radar was also used in the derivation of a relationship between radar reflectivity and precipitation rate. Final results were promising enough. The behaviour of the mathematical model has showed excellent agreement with site diversity gain curves from empirical models based on rain attenuation.

Keywords— precipitation rate, site diversity, Amazon region, meteorological radar, radiometeorology.

I. INTRODUÇÃO

A diversidade de sítio representa a solução técnica mais eficiente para compensar o efeito da atenuação por chuva em enlaces terra-satélite que operam em frequências acima de

¹ Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro e Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro – RJ - jlcerq@terra.com.br

² Universidade Federal Fluminense – Niterói -RJ, msassis@openlink.com.br

³ Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro – RJ - smello@cetuc.puc-rio.br

10 GHz. É claro que esta solução implica em maior custo na implementação do sistema. Entretanto, em locais onde o emprego de comunicações via satélite seja a melhor alternativa, a relação custo-benefício poderá justificar o investimento realizado. A Amazônia é um exemplo a ser citado, uma vez que as distâncias envolvidas e a barreira natural da floresta indicam o satélite como um caminho natural para resolver os problemas de comunicações. Por outro lado, o uso da banda Ku (12 – 18 GHz) nesta região poderá ser inviabilizado se não houver uma utilização criteriosa de técnicas que possibilitem a operação dentro de padrões aceitáveis de disponibilidade.

Com base em medidas de radar realizadas na localidade de Cruzeiro do Sul, divisa do Acre com Amazonas, este trabalho analisa o problema da variação espacial da chuva na região equatorial. Trata-se de um passo importante no sentido de desenvolver, a partir de uma sólida base física, um modelo que permita avaliar o desempenho da diversidade de sítio. A segunda parte desta pesquisa, em andamento, será estabelecer um procedimento de cálculo da atenuação por chuva aplicável nas condições de interesse na Amazônia, quais sejam, altas taxas de precipitação e ângulos de elevação acima de 60°. Cumpre ressaltar que, em tais condições, o modelo [1] adotado atualmente pelo Setor de Radiocomunicações da União Internacional de Telecomunicações (UIT-R) apresenta um comportamento aparentemente inadequado [2]. Esta questão está sendo investigada e os resultados obtidos serão publicados oportunamente.

Os dados experimentais aqui apresentados são provenientes de um amplo programa de pesquisa em radiometeorologia que está sendo realizado na região amazônica, sob a responsabilidade do Instituto Militar de Engenharia (IME), com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) e do Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM). Este programa tem como base de medidas a rede de radares e pluviógrafos mostrada na Figura 1.

II. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA

A questão fundamental que se apresenta é determinar a separação que deve existir entre as duas estações terrenas de uma configuração em diversidade para que o efeito da chuva seja minimizado e permita que a disponibilidade seja adequada

para o serviço que está sendo prestado. Para isto torna-se necessário avaliar a probabilidade de que uma determinada taxa de precipitação (R_0) seja excedida, simultaneamente, nas duas estações distanciadas por uma distância L_0 .

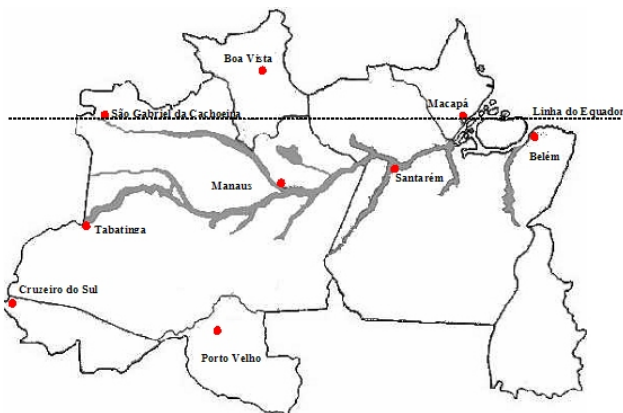


Fig. 1. Rede de Pluviômetros e Radares Meteorológicos.

Esta probabilidade pode ser determinada através de uma probabilidade condicional:

$$P(R_1 > R_0 \text{ e } R_2 > R_0) = P(R_2 > R_0 / R_1 > R_0) \cdot P(R_1 > R_0) \quad (1)$$

onde R_1 e R_2 são as taxas de precipitação na estação 1 e 2, respectivamente.

A probabilidade da chuva ser excedida na estação 1, $P(R_1 > R_0)$, será dada pela função distribuição cumulativa da chuva na região, $F_R(R_0)$.

A probabilidade da chuva da estação 2 exceder a chuva especificada, dado que a chuva na estação 1 está excedida, $P(R_2 > R_0 / R_1 > R_0)$, pode ser determinada pela união de dois eventos disjuntos, isso é, a probabilidade das estações 1 e 2 serem atingidas pela mesma célula de chuva (p_{mc}) ou a probabilidade de serem atingidas por células distintas (p_{cd}).

Nos cálculos destas probabilidades, leva-se em conta a função densidade de probabilidade do tamanho horizontal da célula de chuva para uma determinada taxa de chuva excedida, $f_D(D, R_0)$. Considerando a seção horizontal de uma célula de chuva como um círculo, este tamanho será definido pelo diâmetro da célula de chuva, D .

A probabilidade da estação 2 ser afetada pela mesma célula de chuva, excedendo R_0 , que está atingindo a estação 1, será dada pelo produto entre probabilidade do diâmetro da célula ser D , $f_D(D, R_0)$, e a probabilidade do centro desta célula esteja em pontos específicos, isso é, pontos que permitam atingir ambas as estações simultaneamente, $p_1(D)$. O valor de $p_1(D)$ será dado por uma relação de áreas.

A probabilidade da estação 2 ser afetada por uma célula de chuva, excedendo R_0 , distinta da que atinge a estação 1, será dada pelo produto entre a probabilidade de existir esta nova célula de chuva, $F_R(R_0)$, e a probabilidades de ambas as

células apresentem diâmetros D_1 e D_2 e estejam em centros específicos de forma a não atingirem, cada uma, as duas estações.

Assim, a equação 1 será determinada por:

$$P(R_1 > R_0 \text{ e } R_2 > R_0) = \left\{ \sum_{D_i=L_0}^{\infty} f_D(D_i, R_0) p_1(D_i) + \right. \quad (2)$$

$$\left. + \left[\left(\sum_{D_i=0}^{L_0} f_D(D_i, R_0) + \sum_{D_i=L_0}^{\infty} [f_D(D_i, R_0) \cdot (1 - p_1(D_i))] \right)^2 F_R(R_0) \right] \right\} F_R(R_0)$$

Pode ser verificado que o valor da probabilidade dada pela equação (2) tende para $F_R(R_0)$ quando a distância entre as duas estações, L_0 , tende para zero. Quando esta distância tende para o infinito, isso é, para valores maiores que o diâmetro máximo de chuva encontrado na região, o valor da probabilidade dada pela equação (2) tende para o quadrado de $F_R(R_0)$.

III. LEVANTAMENTO DE DADOS E ANÁLISE DAS MEDIDAS

O primeiro passo para o cálculo das probabilidades associadas à estrutura horizontal da chuva, foi o de se estabelecer uma relação entre a refletividade (Z) do radar e a taxa de precipitação (R). Para isto, foram utilizadas medidas realizadas no período de agosto a dezembro de 2004, totalizando 6.908 imagens do tipo CAPPI (“Constant Altitude Plan Polar Indicator”), provenientes do radar de Cruzeiro do Sul, obtidas a uma altura em relação ao solo de 2 km e com uma distância máxima ao radar de 80 km. Este valor de altura foi utilizado por ser um valor intermediário entre o solo e a altura da célula de chuva, considerando também que a variação da refletividade (Z) com a altura no percurso da chuva não é relevante [3]. Ao final de uma varredura CAPPI dispõe-se de um valor de Z em cada quadrícula de dimensão 1 km x 1 km. De posse de tais medidas, utilizando como referência a relação de Marshall e Palmer [4], ou seja,

$$Z(\text{mm}^6/\text{m}^3) = 200[R(\text{mm/h})]^{1.6} \quad (3)$$

e tendo como elemento de comparação à distribuição cumulativa da taxa de precipitação medida no pluviógrafo localizado nas vizinhanças do radar, chegou-se a

$$Z(\text{mm}^6/\text{m}^3) = 207[R(\text{mm/h})]^{1.53} \quad (4)$$

Os detalhes da obtenção de (4) estão descritos em outra publicação [5]. Observa-se que a relação é muito próxima de Marshall e Palmer. Isto era esperado, uma vez que, para o objetivo pretendido neste trabalho, considerou-se o limiar da taxa de precipitação em 5 mm/h, abrangendo, desta forma, tanto chuva estratiforme, como chuva convectiva. A figura 2 apresenta a distribuição cumulativa da taxa de precipitação medida pelo pluviógrafo no período de janeiro a dezembro de 2004 e aquela obtida a partir da equação (4).

A seguir, associando a cada quadrícula o valor de R correspondente, considerou-se como chuva toda quadrícula com taxa de precipitação igual ou superior a 5 mm/h. Definiram-se as células de chuva excedendo R_0 , como o conjunto de quadrículas, com $R > R_0$, que apresentasse ligação horizontal ou vertical entre seus lados. A área de cada célula foi determinada pelo número de quadrículas existentes.

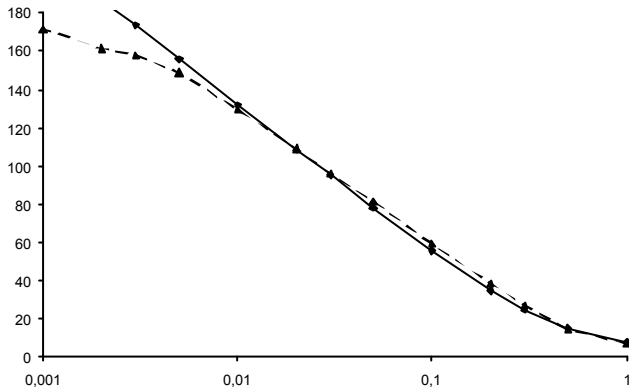


Fig. 2. Função distribuição acumulativa da chuva em Cruzeiro do Sul (F_R) medida pelo pluviógrafo (- -) e através da equação 4 (—). Eixo horizontal marca a probabilidade (%) e o eixo vertical o valor da taxa de precipitação cumulativa excedida (mm/h).

Fazendo equivalência da área irregular assim obtida com uma circunferência, chegou-se a uma distribuição dos valores de diâmetro da célula para cada taxa de precipitação excedida. Assim foi possível traçar a Figura 3 que apresenta a porcentagem do número de células (eixo vertical) com diâmetro superior ao valor indicado no eixo horizontal para $R \geq R_0$, sendo R_0 o limiar tomado como referência em cada curva.

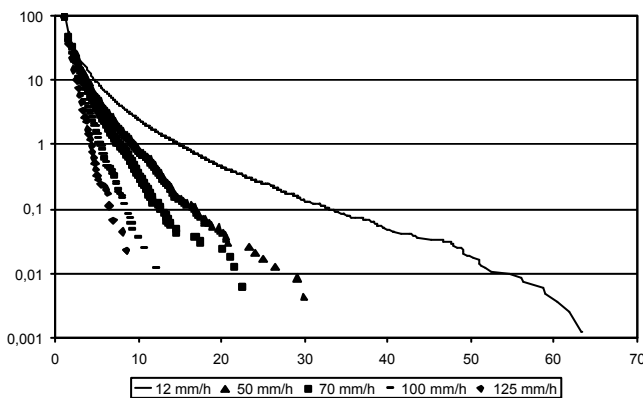


Fig. 3. Porcentagem do número de células (%), eixo vertical, com diâmetro (km) superior ao valor indicado no eixo horizontal, para diversos valores de $R \geq R_0$, sendo R_0 o limiar tomado como referência em cada curva.

Por fim, baseado na equação (2), obtém-se então a Figura 4 que mostra a porcentagem de tempo que uma taxa de precipitação acima de R_0 é excedida em duas estações separadas por uma determinada distância, L_0 .

Verifica-se nesta figura que existe uma saturação das curvas entre 10 e 15 km. Este resultado é similar ao que se observa nas curvas de ganho de diversidade obtidos a partir de modelos empíricos que tem por base a atenuação do sinal [1,6]. Considerando que os parâmetros de sistema, tais como, frequência, polarização e ângulo de elevação afetam unicamente o valor da atenuação, conclui-se que o efeito de saturação é função apenas da descorrelação da chuva à medida que aumenta a distância de separação entre os terminais.

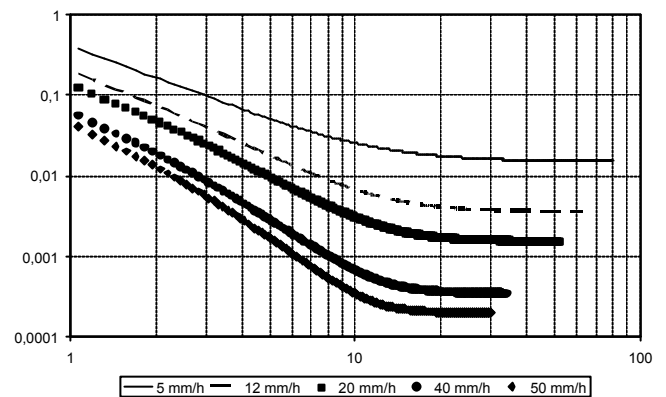


Fig. 4. Porcentagem de tempo (%), eixo vertical, que uma taxa de precipitação acima de R_0 (mm/h) é excedida em duas estações separadas por uma determinada distância L_0 (km), eixo horizontal.

Em vista deste resultado, procurou-se definir um relacionamento entre a taxa de chuva excedida em uma estação isoladamente (R_A) em uma dada porcentagem de tempo (p) e o valor da taxa excedida simultaneamente em duas estações (R_B), separadas por uma distância da na mesma porcentagem de tempo. O melhor ajuste correspondeu a,

$$R_A = R_B \cdot (12,5 p + 1,1) D^{(0,42 \log(p) + 1,9)} \quad (5)$$

sendo R_A e R_B em mm/h, D em km e p em %.

A expressão (5) é considerada ainda preliminar, pois se pretende investigar dados de outras estações na mesma linha do que foi feito neste trabalho. Pode-se, no entanto, adiantar que se espera um comportamento similar, pois as características da chuva na região em estudo não apresentam variações significativas.

IV. CONCLUSÕES

Tendo por referência medidas (radar e pluviógrafo) realizadas em Cruzeiro do Sul, AC, este trabalho analisou o problema da variação espacial da taxa de precipitação na região Amazônica. A fórmula matemática desenvolvida para modelar esta variação mostrou-se plenamente

satisfatória. A saturação observada na figura 4 do trabalho é similar ao comportamento observado nas curvas empíricas de ganho de diversidade, demonstrando que o modelo definido pela equação (2) é adequado para análise da variação espacial da taxa de precipitação. Com base neste resultado foi proposta uma fórmula prática a ser utilizada no dimensionamento da separação entre terminais de um sistema de diversidade de sítio.

REFERÊNCIAS

- [1] UIT-R, “Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems”, *Recommendation ITU-R P.618-8*, Genebra, 2002.
- [2] UIT-R, “Comments on Recommendation ITU-R P.618-7 - Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems”, *Doc. 3M-17*, WP-3M, Fortaleza, Brasil, 2003.
- [3] P. Misme e P. Waldteufel, “A model for attenuation by precipitation on a microwave earth-space link”, *Radio Science*, v. 15, nr. 3, p. 655-665, Jul 1980.
- [4] A. Pawlina, “Essential knowledge of rain structure for radio applications based on available data and models”, *Radio Africa 99*, Gaborone, Botswana, 1999.
- [5] Cerqueira, J. L., “Estudo radiometeorológico da região Amazônica”, *Dissertação de Doutorado*, PUC - Rio, Brasil, (em preparação).
- [6] D. B. Hodge, “An improved model for diversity gain on earth-space propagation paths”, *Radio Science*, v. 17, p. 1393-1399, 1982.