



PRESIDENCIA DA REPUBLICA
SECRETARIA DA CIENCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5444-TDI/490

**ESTIMATIVAS DA TEMPERATURA E UMIDADE DO DOSSEL NA FLORESTA
AMAZÔNICA, UTILIZANDO DADOS DE MICROONDAS DO SENSOR SMMR DO
SATÉLITE NIMBUS-7**

Jorge Luís Silva Brito

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto orientada
pelos Drs. Nelson Jesus Ferreira e Jesus Marden dos Santos,
aprovada em julho de 1992.

INPE

São José dos Campos

Setembro de 1992

SECRETARIA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5444-TDI/490

ESTIMATIVAS DA TEMPERATURA E UMIDADE DO DOSSEL NA FLORESTA
AMAZÔNICA, UTILIZANDO DADOS DE MICROONDAS DO SENSOR SMMR DO
SATÉLITE NIMBUS-7

Jorge Luis Silva Brito

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto orientada
pelos Drs. Nelson Jesus Ferreira e Jesus Marden dos Santos,
aprovada em julho de 1992.

INPE
São José dos Campos
Setembro de 1992

528.711.7:551.5(811.3)


BRITO, J.L.S.

Estimativas da temperatura e umidade do dossel na Floresta Amazônica, utilizando dados de microondas do sensor SMMR do satélite Nimbus-7. / J.L.Brito. -- São José dos Campos: INPE, 1992. 113p. -- (INPE-5444-TDI/490)

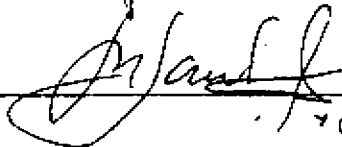
1. Floresta Amazônica. 2. Emissão de microondas. 3. Temperatura. 4. Umidade.
I. Título

Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Sensoriamento Remoto

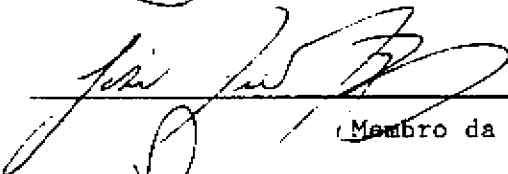
Dr. Nelson Jesus Ferreira


Orientador/Presidente

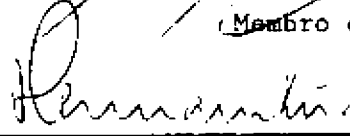
Dr. Jesus Marden dos Santos


Orientador

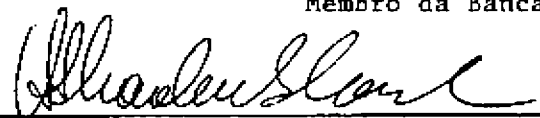
Dr. Getúlio Teixeira Batista


Membro da Banca

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux


Membro da Banca

Dr. Hilton Thadeu Zarate do Couto


Membro da Banca
- Convidado -

Candidato: Jorge Luís Silva Brito

São José dos Campos, 29 de julho de 1992

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é o resultado de um programa de cooperação Franco-Brasileira para o estudo da Amazônia. Agradeço em particular ao cooperante do convênio CNES/INPE, Jean-Christophe Calvet, pelo apoio concedido na aquisição e implementação dos modelos e dos dados de satélite utilizados. Agradeço também :

Aos Drs. Jesus Marden dos Santos e Nelson Jesus Ferreira pela orientação, apoio e colaboração.

Aos Drs. Getúlio Texeira Batista, João Viane Soares, Hermann J. H. Kux e Hilton Thadeu Zerate do Couto pelas sugestões.

Aos funcionários do laboratório de tratamento de imagens meteorológicas José Luis de Oliveira, Jorge Luiz Martins Nogueira, Egidio Arai e Maria Mazarela pelo apoio técnico.

Ao desenhista Joaquim Godoi Filho pelo apoio técnico.

A Lindinaldo Gomes de Souza e Liliane Abdo Alves de Almeida pelas sugestões e colaboração.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Especiais e CAPES pelo auxílio técnico e financeiro.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Obtiveram-se estimativas de umidade e temperatura da cobertura vegetal em mata de terra firme da região de Manaus (3° S, 60° W), durante as estações úmida (abril/maio) e seca (julho/agosto) de 1985, às 12:00 e 24:00 horas local, a partir de dados radiométricos de microondas medidos por satélite, em conjunto com modelos de emissão de microondas. Os dados de satélite consistem em temperaturas de brilho corrigidas do sensor SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer) do satélite Nimbus-7, nas frequências de 6.6, 10.7, 18.0 e 37.0 GHz. Para modelar o sinal emitido pela cobertura vegetal, foram utilizados dois modelos numéricos: o modelo discreto, que calcula os coeficientes de espalhamento e a absorção de cada bioelemento da cobertura vegetal (troncos, galhos e folhas), e o modelo contínuo, que usa uma descrição estatística das propriedades dielétricas do dossel. Foram utilizados dados micrometeorológicos obtidos pelos experimentos GTE/ABLE-2A (GLOBAL Tropospheric Experiment/Amazon Boundary Layer Experiment 2A) e ARME (Anglo-Brazilian Amazon Region Micrometeorological Experiment), realizados na Reserva Florestal Ducke (2° 57' S, 59° 57' W). Fez-se também um estudo de sensibilidade dos modelos com o objetivo de avaliar a influência dos parâmetros de umidade, gradiente de temperatura e biomassa da cobertura vegetal, na temperatura de brilho simulada pelos modelos. O teste de sensibilidade indicou que há necessidade de usar a frequência de 37.0 GHz e as baixas frequências para proceder à inversão dos parâmetros de estrutura, umidade e temperatura. Os valores de umidade, obtidos através da inversão do modelo contínuo, foram coerentes com os obtidos por outros autores em experimentos de campo na região de estudo. Definiu-se um índice de umidade (diferença normalizada da umidade otimizada nas frequências de 37.0 e 6.6 GHz) que se apresentou como um bom indicador da resistência estomática da vegetação.

ESTIMATIONS OF TEMPERATURE AND HUMIDITY OF THE CANOPY IN
AMAZON FOREST USING MICROWAVE DATA FROM SMMR SENSOR OF
NIMBUS-7 SATELLITE.

ABSTRACT

The forest canopy humidity and temperature of the region of Manaus (3° S, 60° W) have been estimated for the 1985 wet (April-May) and dry (July-August) seasons at 12:00 and 00:00 local standard time, from spaceborne microwave radiometer, along with microwave emission models. The satellite data consist of SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer) Nimbus-7 corrected brightness temperatures for the 6.6, 10.7, 18.0 and 37.0 GHz frequencies. To model the signal emitted by the forest canopy, two different numerical models were used: a discrete model, which calculates the scattering and absorbing coefficients of each bioelement of the canopy (stems, branches and leaves), and a continuous model, which uses a statistical description of the canopy dielectric properties canopy. Micrometeorological data obtained from the GTE/ABLE-2A (GLOBAL Tropospheric Experiment/Amazon Boundary Layer Experiment 2A), and ARME (Anglo-Brazilian Amazon Region Micrometeorological Experiment) at the Duck Reserve ($2^{\circ}57'$ S, $59^{\circ}57'$ W) have been used. A sensitivity study of the models has also been conducted to evaluate the influence of the moisture, temperature gradient and vegetal biomass on the brightness temperatures simulated by the models. The sensitivity test has indicated that it is necessary to use both the 37.0 GHz and low frequencies to carry out the inversion of the structure parameters, moisture and temperature. The moisture values obtained through the inversion of the continuous model have been consistent with the ones obtained by other authors in field experiments in the Amazon region. A moisture index has been defined (normalized difference of the optimized moisture at 37.0 and 6.6 GHz frequencies), and has shown to be a good index of the vegetation stomatal resistance.

SUMÁRIO

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| LISTA DE FIGURAS | xv |
| LISTA DE TABELAS | xxi |
| LISTA DE SÍMBOLOS | xxiii |
| | |
| <u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u> | 1 |
| | |
| <u>CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</u> | 5 |
| 2.1 - Emissão termal de microondas | 5 |
| 2.1.1 - Temperatura de brilho | 7 |
| 2.1.2 - Equação de transferência radiativa | 8 |
| 2.1.3 - Modelo simplificado de transferência radiativa | 10 |
| 2.1.4 - Componentes de radiação detectadas por um sensor a bordo de satélite | 12 |
| 2.2 - Modelagem da cobertura vegetal | 15 |
| 2.2.1 - Modelos de difusão de volume | 16 |
| 2.2.2 - Cálculo da matriz de fase para meios discretos | 18 |
| 2.2.3 - Cálculo da matriz de fase para meios contínuos | 20 |
| 2.2.4 - Cálculo dos coeficientes de difusão, absorção e extinção | 21 |
| 2.2.4.1 - Cálculo do coeficiente de difusão | 21 |
| 2.2.4.2 - Cálculo do coeficiente de absorção | 22 |
| 2.2.4.3 - Cálculo do coeficiente de extinção | 23 |
| 2.2.5 - Resolução das equações de transferência radiativa | 24 |
| | |
| <u>CAPÍTULO 3 - DADOS E METODOLOGIA</u> | 27 |
| 3.1 - Descrição dos modelos utilizados | 27 |
| 3.1.1 - Modelo discreto | 28 |
| 3.1.2 - Modelo contínuo | 30 |
| 3.2 - Descrição da área de estudo | 33 |

| | |
|---|----|
| 3.3 - Dados orbitais | 37 |
| 3.3.1 - O sensor SMMR | 37 |
| 3.3.2 - Processamento dos dados SMMR | 38 |
| 3.3.2.1 - Correção atmosférica da temperatura de brilho da vegetação | 39 |
| 3.4 - Medidas micrometeorológicas | 42 |
| 3.5 - Dados da cobertura vegetal | 43 |
| 3.5.1 - Troncos e galhos | 42 |
| 3.5.2 - Folhas | 44 |
| 3.6 - Análise de sensibilidade dos modelos | 45 |
| 3.7 - Inversão dos modelos | 46 |
| | |
| <u>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES</u> | 47 |
| | |
| 4.1 - Parâmetros de estrutura da vegetação | 47 |
| 4.2 - Análise de sensibilidade do modelo contínuo | 49 |
| 4.2.1 - Sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical, e da razão de polarização à fração volumétrica da vegetação | 49 |
| 4.2.2 - Sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical e da razão de polarização à umidade da vegetação..... | 53 |
| 4.2.3 - Sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical, e da razão de polarização ao gradiente de temperatura da vegetação | 57 |
| 4.2.4 - Sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical e da razão de polarização à temperatura da superfície | 60 |
| 4.3 - Valores de temperatura e umidade obtidos através da inversão do modelo contínuo | 63 |
| 4.3.1 - Temperatura da vegetação | 63 |
| 4.3.2 - Umidade da vegetação | 69 |
| | |
| <u>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</u> | 73 |
| | |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 75 |

| | |
|---|----|
| APÊNDICE A - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO | |
| DISCRETO | 83 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|------|
| 2.1 - Comparação entre a lei de Planck e a lei de Rayleigh-Jeans para um corpo na temperatura de 300 K | 7 |
| 2.2 - Representação da aproximação de "Delta-Eddigton" para o termo de difusão múltipla | 10 |
| 2.3 - Componentes de radiação detectadas por um sensor a bordo de satélite | 13 |
| 2.4 - Efeito de nuvens na transmissão de microondas do espaço para a superfície | 14 |
| 2.5 - Efeito da chuva na transmissão de microondas do espaço para a superfície | 14 |
| 2.6 - Medida da dependência da constante dielétrica à umidade das folhas de milho | 15 |
| 3.1 - Configuração geométrica de um meio aleatório com duas camadas | 30 |
| 3.2 - Método de resolução do sistema de equações de transferência radiativa, utilizado no modelo contínuo | 31 |
| 3.3 - Mapa de localização da área de estudo | 34 |
| 3.4 - Mosaico de imagens TM/Landsat, banda 5, obtidas entre 1986 e 1989 | 35 |
| 3.5 - Mapa de vegetação da área de estudo, com as regiões fitoecológicas | 36 |
| 3.6 - Valores de temperatura de brilho da vegetação e de absortância atmosférica, calculados para às 12:00 horas local, durante as estações de 1985: a) úmida e b) seca..... | 41 |
| 3.7 - Espessura dos quatro estratos da vegetação ... | 43 |
| 4.1 - Variação da temperatura de brilho, com polarização vertical, como função da fração volumétrica da vegetação, simulada pelo modelo contínuo, | 51 |

| | |
|--|----|
| 4.2 - Sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical, à fração volumétrica da vegetação, simulada pelo modelo contínuo | 51 |
| 4.3 - Variação da razão de polarização, como função da fração volumétrica da vegetação, simulada pelo modelo contínuo | 52 |
| 4.4 - Sensibilidade da razão de polarização à fração volumétrica da vegetação, simulada pelo modelo contínuo | 52 |
| 4.5 - Variação da temperatura de brilho com polarização vertical, como função da umidade da vegetação, simulada pelo modelo contínuo, | 55 |
| 4.6 - Sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical, à da umidade da vegetação, simulada pelo modelo contínuo..... | 55 |
| 4.7 - Variação da razão de polarização, como função da umidade da vegetação, simulada pelo modelo contínuo | 56 |
| 4.8 - Sensibilidade da razão de polarização à umidade da vegetação, simulada pelo modelo contínuo | 56 |
| 4.9 - Variação da temperatura de brilho com polarização vertical, como função do gradiente de temperatura, simulada pelo modelo contínuo .. | 58 |
| 4.10 - Sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical, ao gradiente de temperatura , simulada pelo modelo contínuo ... | 58 |
| 4.11 - Variação da razão de polarização, como função do gradiente de temperatura da vegetação, simulada pelo modelo contínuo | 59 |
| 4.12 - Sensibilidade da razão de polarização ao gradiente de temperatura, simulada pelo modelo contínuo | 59 |
| 4.13 - Variação da temperatura de brilho com polarização vertical, como função da temperatura da superfície, simulada pelo modelo contínuo . | 61 |

| | |
|---|----|
| 4.14 - Sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical, como função da temperatura da superfície, simulada pelo modelo contínuo | 61 |
| 4.15 - Variação da razão de polarização, como função da temperatura da superfície, simulada pelo pelo modelo contínuo | 62 |
| 4.16 - Sensibilidade da razão de polarização à temperatura da superfície, simulada pelo modelo contínuo | 62 |
| 4.17 - Temperaturas da vegetação às 12:00 horas local obtidas pela inversão do modelo contínuo, temperaturas do ar e taxas de precipitação medidas na Reserva Florestal Ducke, para a estação úmida (abril/maio) de 1985 | 65 |
| 4.18 - Temperaturas da vegetação às 24:00 horas local obtidas pela inversão do modelo contínuo, temperaturas do ar e taxas de precipitação medidas na Reserva Florestal Ducke, para a estação úmida (abril/maio) de 1985 | 66 |
| 4.19- Temperaturas da vegetação às 12:00 horas local obtidas pela inversão do modelo contínuo, temperaturas do ar e taxas de precipitação medidas na Reserva Florestal Ducke, para a estação seca (julho/agosto) de 1985 | 67 |
| 4.20 - Temperaturas da vegetação às 24:00 horas local obtidas pela inversão do modelo contínuo, temperaturas do ar e taxas de precipitação medidas na Reserva Florestal Ducke, para a estação seca (julho/agosto) de 1985 | 68 |
| 4.21 - Relação entre a razão de umidade obtida através da inversão do modelo contínuo e resistência estomática de <i>Piptadenia suaveolens</i> , na Reserva Ducke, durante as estações úmida (abril/maio) e seca (julho/agosto) de 1985 | 70 |

| | |
|--|----|
| 4.22 - Valores de umidade da vegetação, obtidos a partir do modelo contínuo, para a estação úmida, às 12:00 e 24:00 horas local, nas frequências de 6.6 e 37.0 GHz. | 71 |
| A.1 - Variação da temperatura de brilho, com polarização vertical, como função do índice de área foliar, simulada pelo modelo discreto | 83 |
| A.2 - Sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical, ao índice de área foliar, simulada pelo modelo discreto | 83 |
| A.3 - Variação da razão de polarização, como função do índice de área foliar, simulada pelo modelo discreto | 84 |
| A.4 - Sensibilidade da razão de polarização ao índice área foliar, simulada pelo modelo discreto.... | 84 |
| A.5 - Variação da temperatura de brilho, com polarização vertical, como função da umidade das folhas, simulada pelo modelo discreto | 85 |
| A.6 - Sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical à umidade das folhas, simulada pelo modelo discreto | 85 |
| A.7 - Variação da razão de polarização, como função da umidade das folhas, simulada pelo modelo discreto | 86 |
| A.8 - Sensibilidade da razão de polarização à umidade das folhas, simulada pelo modelo discreto | 86 |
| A.9 - Variação da temperatura de brilho, com polarização vertical, como função do gradiente de temperatura, simulada pelo modelo discreto .. | 87 |
| A.10 - Sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical, ao gradiente de temperatura da vegetação, simulada pelo modelo discreto | 87 |
| A.11 - Variação da razão de polarização, como função do gradiente de temperatura da superfície, simulada pelo modelo discreto | 88 |

| | |
|--|----|
| A.12 - Sensibilidade da razão de polarização ao gradiente de temperatura da vegetação, simulada pelo modelo discreto | 88 |
| A.13 - Variação da temperatura de brilho, com polarização vertical, como função da temperatura da superfície, simulada pelo modelo discreto .. | 89 |
| A.14 - Sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical, à temperatura da superfície, simulada pelo modelo discreto | 89 |
| A.15 - Variação da razão de polarização, como função da temperatura da superfície, simulada pelo modelo discreto | 90 |
| A.16 - Sensibilidade da razão de polarização à temperatura da superfície, simulada pelo modelo discreto | 90 |

LISTA DE TABELAS

| | <u>Pag.</u> |
|--|-------------|
| 3.1 - Parâmetros da vegetação de entrada no modelo discreto | 29 |
| 3.2 - Parâmetros da vegetação de entrada no modelo contínuo | 32 |
| 3.3 - Parâmetros do solo de entrada nos modelos contínuo e discreto | 32 |
| 3.4 - Frequência e resolução dos canais do sensor SMMR | 37 |
| 3.5 - Classes de troncos da floresta de terra firme .. | 43 |
| 3.6 - Classes de galhos da floresta de terra firme .. | 44 |
| 3.7 - Parâmetros de entrada nos modelos para os quais o teste de sensibilidade foi aplicado .. | 46 |
| 4.1 - Parâmetros de estrutura e umidade da vegetação calibrados, para o dia juliano 100, através do modelo contínuo | 48 |
| A.1 - Parâmetros de estrutura da vegetação e umidade das folhas, calibrados para o dia Juliano 100, através do modelo discreto | 81 |

LISTA DE SÍMBOLOS

Latinos

| | |
|------------|---|
| B_f | - radiância espectral, $W m^{-2} Sr^{-1} Hz^{-1}$ |
| c | - velocidade da luz no vácuo, $3 \times 10^8 m s^{-1}$ |
| E | - irradiância, $W m^{-2}$ |
| ϵ | - emissividade |
| f | - frequência, Hz |
| h | - constante de Planck, $6.6256 \times 10^{-34} J s$ |
| H | - altura da cobertura vegetal, m |
| I | - intensidade radiante, $W Sr^{-1}$ |
| k | - constante de Boltzman, $1.38 \times 10^{-23} J K^{-1}$ |
| K_a | - coeficiente de absorção, m^{-1} |
| K_e | - coeficiente de extinção, m^{-1} |
| K_s | - coeficiente de difusão, m^{-1} |
| k_0 | - número de onda no espaço livre, m^{-1} |
| L_z | - comprimento de correlação vertical |
| L_ρ | - comprimento de correlação horizontal |
| M | - Matriz de Stokes |
| N | - número de elementos difusores por unidade de volume, m^{-3} |
| P | - matriz de fase |
| Q | - seção transversal de um objeto, m^2 |
| r | - raio da partícula |
| RE | - resistência estomática, $s.m^{-1}$ |
| RP | - razão de polarização |
| S | - matriz de difusão |
| T | - temperatura absoluta, K |
| TB | - temperatura de brilho, K |
| TE | - temperatura efetiva da cobertura vegetal, K |
| U_v | - umidade da vegetação em peso, $kg kg^{-2}$ |
| U_f | - umidade das folhas em peso, $kg Kg^{-1}$ |

Gregos

| | |
|-----------------------|---|
| α | - fração de difusão frontal |
| β | - função densidade de probabilidade |
| Γ | - gradiente de temperatura, k m^{-2} |
| δ | - variância |
| ϵ | - permissividade, F m^{-1} |
| ϵ_0 | - permissividade no espaço livre, 8.85×10^{-12} F m^{-1} |
| ϵ' | - parte real da permissividade, F m^{-1} |
| $\epsilon_f(\bar{r})$ | - função tridimensional que representa as flutuações da permissividade no meio |
| ϵ_t | - permissividade complexa, F m^{-1} |
| ϵ_m | - permissividade média, F m^{-1} |
| λ | - comprimento de onda, m |
| λ_0 | - comprimento de onda no espaço livre, m |
| η | - impedância intrínseca, Ω |
| θ | - ângulo de incidência, em graus |
| μ | - co-seno de θ |
| σ_e | - seção transversal de extinção, m^{-2} |
| τ | - espessura óptica, m^{-1} |
| ψ | - ângulo azimutal |
| Ω | - ângulo sólido, Sr |
| ω | - albedo |

Índices Inferiores

| | |
|------|--|
| p | - tipo de polarização da onda eletromagnética, v para polarização vertical e h para polarização horizontal |
| i, s | - direção do campo eletromagnético, com i para o campo incidente e s para o campo difuso |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A estimativa da evapotranspiração da superfície terrestre é de grande importância para a modelagem do clima e para o monitoramento agrometeorológico da biosfera.

Usualmente, estimativas de evapotranspiração são feitas a partir de dados obtidos em estações meteorológicas convencionais. No caso de regiões de difícil acesso, como a floresta Amazônica, essas estações são esparsas. Além disso, os fenômenos hidrológicos diferenciam-se espacial e temporalmente, ao passo que as técnicas convencionais de coleta de dados são espacialmente limitadas, o que permite a geração de informações apenas pontuais (Novo, 1988).

A evapotranspiração depende de dois balanços interligados, o balanço de energia e o balanço hidrológico da superfície. A variável resultante do balanço de energia é a temperatura da superfície, que pode ser obtida por radiometria de microondas. Uma das variáveis resultantes do ciclo hidrológico é a umidade do solo e da cobertura vegetal, as quais podem ser avaliadas com o auxílio desta mesma técnica.

A principal vantagem da utilização da técnica de radiometria de microondas está na possibilidade de obtenção de dados sobre a superfície, mesmo sob condições de nebulosidade. Isto é de particular interesse para a região da floresta Amazônica, onde o índice de cobertura de nuvens é relativamente alto.

Neste contexto, a metodologia da radiometria de microondas utilizada apresenta-se como uma ferramenta com potencial para a obtenção dos parâmetros de umidade e temperatura do dossel da floresta.

Para interpretar o sinal de microondas emitido pela superfície existem modelos que simulam a temperatura de brilho da cobertura vegetal utilizando a teoria de transferência radiativa (Choudhury et al., 1990; Mo et al., 1982; Kerr e Njoku, 1990; Isaacs et al., 1989), na qual os efeitos dos processos físicos de absorção, extinção e difusão do meio são quantificados.

Calvet e Kerr (1991) utilizaram modelos de emissão de microondas e dados de temperatura de brilho do "Scanning Multichannel Microwave Radiometer" (SMMR) do satélite Nimbus-7 para obter informações sobre a umidade do dossel da floresta Amazônica. Como continuidade do trabalho desses pesquisadores, os dados SMRR poderão ser utilizados para avaliar a temperatura e a umidade do dossel da floresta Amazônica.

Este trabalho tem por objetivo utilizar modelos discretos e contínuos de emissão de microondas, juntamente com dados de temperatura de brilho do sensor SMMR do satélite Nimbus 7, para a obtenção de informações sobre a evolução da umidade e temperatura do dossel e da floresta Amazônica, numa escala de modelos de circulação geral (100 x 100 km). Para alcançar esse objetivo, o trabalho foi dividido nas seguintes etapas:

- descrição dos princípios teóricos da emissão de microondas passivo;
- descrição dos modelos discretos e contínuos de emissão de microondas;

- estudo de sensibilidade dos modelos, de forma a identificar os parâmetros de entrada que têm maior influência na variável de saída;
- obtenção de informações sobre a umidade e temperatura da floresta Amazônica através dos dados do sensor SMMR do satélite Nimbus-7 e da inversão dos modelos.

Espera-se que essas informações sejam utilizadas como dados de entrada para modelos de estimativa de evapotranspiração.

No capítulo 2 é apresentado os princípios físicos de emissão de microondas pela cobertura vegetal.

No capítulo 3 são apresentados o conjunto de dados e a metodologia aplicada para alcançar os objetivos propostos.

No capítulo 4 discute-se os resultados referentes ao estudo de sensibilidade do modelo contínuo; e os resultados referentes aos valores de temperatura e umidade do dossel da floresta, obtidos através da inversão do modelo contínuo. Os resultados referentes ao estudo de sensibilidade do modelo discreto são apresentados no Apêndice A.

As conclusões e recomendações deste trabalho estão no capítulo 5.

CAPÍTULO 2FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A emissão térmica de microondas para superfícies vegetadas é caracterizada pela temperatura de brilho da superfície. Modelos físicos têm sido desenvolvidos para interpretar os dados de temperatura de brilho, coletados por sistemas sensores a bordo de satélites e aeronaves. Esses modelos utilizam as equações de transferência radiativa para calcular a emissão da superfície.

Neste capítulo será apresentada a teoria de transferência radiativa para microondas e os principais modelos de emissão térmica da cobertura vegetal.

2.1 - EMISSÃO TERMAL DE MICROONDAS

De acordo com a lei de radiação de Planck, um corpo negro numa dada temperatura T irradia energia eletromagnética em todas as direções, com uma radiância espectral (B_f) dada pela expressão (Ulaby et al. 1981):

$$B_f(T) = \frac{2hf^3}{c^2} \left(\frac{1}{\exp(hf/kT) - 1} \right) \text{ (w.m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}) \quad (2.1)$$

onde:

- h = constante de Planck ($6,6256 \times 10^{-34} \text{ J}$);
- f = frequência (Hz);
- T = temperatura absoluta (K);
- c = velocidade da luz ($3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$).
- k = constante de Boltzman ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$)

De acordo com a Lei de Rayleigh-Jeans, válida para a região de microondas, a intensidade radiante emitida pelo alvo é diretamente proporcional à temperatura da superfície. Esta Lei pode ser obtida a partir da aproximação da Equação 2.1, fazendo as seguintes considerações.

Se $hf/kT \ll 1$, pode-se através de uma expansão de Taylor, afirmar que:

$$\exp(x) - 1 = (1 + x + x^2 + \dots) - 1 \cong x, \quad p/x \ll 1. \quad (2.2)$$

Desta maneira, pode-se representar a lei de Rayleigh-Jeans aplicando a aproximação dada pela Equação 2.2 na Equação 2.1:

$$B_f(T) = \frac{2f^2 kT}{c^2}. \quad (2.3)$$

Escrevendo a Equação 2.3 em função do comprimento de onda λ (com $\lambda=c/f$), tem-se:

$$B_f(T) = \frac{2kT}{\lambda^2}. \quad (2.4)$$

A Figura 2.1 mostra que para a região de microondas do espectro eletromagnético, situada entre as frequências de 1.0 a 300 GHz, a lei de Rayleigh-Jeans desvia-se muito pouco da lei de radiação de Planck.

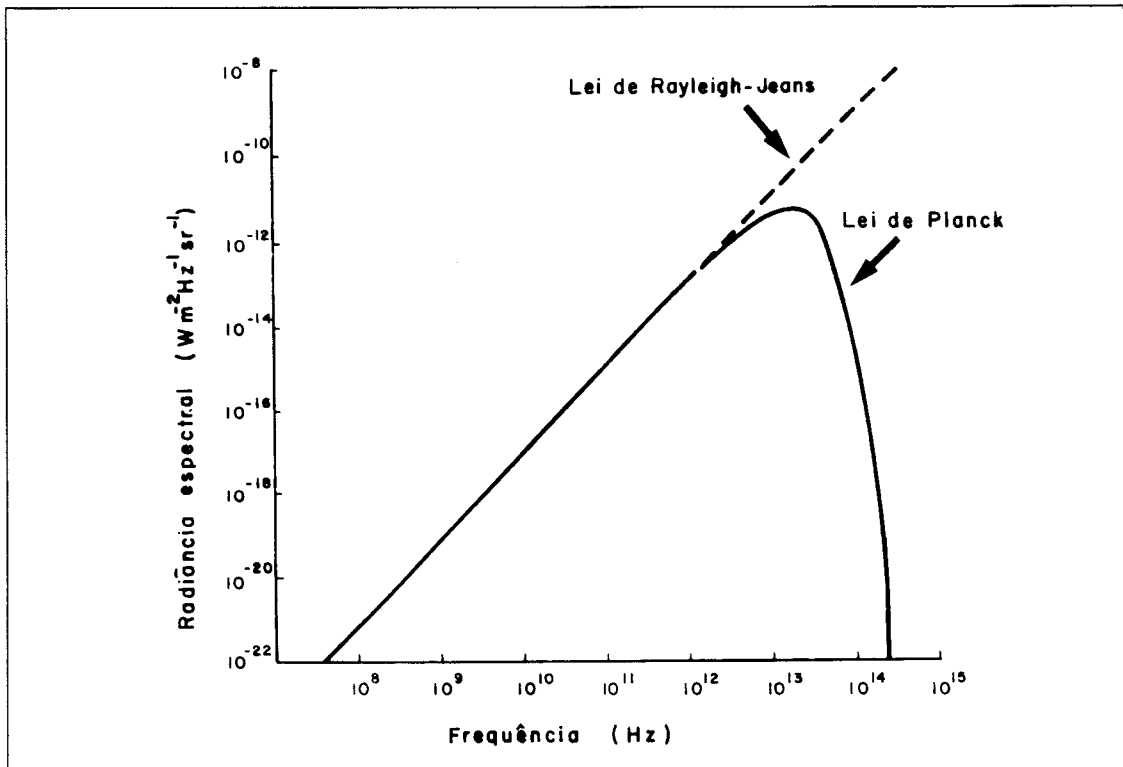


Fig. 2.1 - Comparação entre a Lei de Planck e a Lei de Rayleigh-Jeans para um corpo na temperatura de 300 K.

FONTE: Adaptada de Ulaby et al. (1981), p.182.

2.1.1.1 - TEMPERATURA DE BRILHO

A temperatura de brilho T_B de um corpo real é definida como a temperatura do corpo negro que produz a mesma emissão térmica (num dado comprimento de onda).

O termo emissividade (ϵ) permite relacionar a temperatura de brilho (T_B) de um objeto à sua temperatura (T), ou seja:

$$T_B = \epsilon T. \quad (2.5)$$

2.1.2 - EQUAÇÃO DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA

A radiação ao atravessar um meio diminuirá sua intensidade. Essa redução é causada pelo processo físico de absorção.

A equação de transferência radiativa contabiliza a variação da intensidade radiante em função da altura da camada (z). O sistema de equações de transferência radiativa para microondas é descrito como (Chandrasekhar, 1960); Chuang et al., 1980):

$$\frac{\mu dI_v(\mu, z)}{dz} = K_a CT(z) - K_{ev}(\mu) \cdot I_v(\mu, z) \quad (2.6a)$$

$$+ \int_{-1}^1 [(v, v') \cdot I_v(\mu', z) + (v, h') \cdot I_h(\mu', z)] d\mu',$$

$$\frac{\mu dI_h(\mu, z)}{dz} = K_a CT(z) - K_{eh}(\mu) \cdot I_h(\mu, z) \quad (2.6b)$$

$$+ \int_{-1}^1 [(h, v') \cdot I_v(\mu', z) + (h, h') \cdot I_h(\mu', z)] d\mu',$$

onde:

μ = co-seno de θ , sendo θ o ângulo zenital da radiação incidente;

T = temperatura do meio (K);

v, h = representa o tipo de polarização da onda;

I = intensidade radiante ($W \cdot Sr^{-1}$);

K_a = coeficiente de absorção do meio (m^{-1});

K_e = coeficiente de extinção do meio (m^{-1}).

Os três termos das equações de transferência radiativa, que contabilizam a variação na intensidade radiante ao atravessar uma camada de espessura z , podem ser descritos como:

- 1) $K_a.C.T$: termo de emissão térmica do próprio meio, no qual a onda eletromagnética se propaga.
- 2) $K_{eV}(\mu).I_V$ e $K_{eH}(\mu).I_H$: termo de extinção para as polarizações vertical e horizontal respectivamente. A onda incidente perde energia através dos fenômenos de absorção e difusão do meio.

$$3) \int_{-1}^1 [(v, v') . I_v(\mu', z) + (v, h') . I_h(\mu', z)] d\mu' \quad e$$

$$\int_{-1}^1 [(h, v') . I_v(\mu', z) + (h, h') . I_h(\mu', z)] d\mu' : \quad \text{são as}$$

funções fontes para a difusão.

2.1.3 - MODELO SIMPLIFICADO DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA

Considerando o caso em que a difusão da radiação incidente é preponderante na direção e sentido da radiação incidente (forward scattering), a aproximação "Delta-Eddington" pode ser aplicada. Esta abordagem consiste em considerar o termo-fonte de difusão como a soma de uma função de Dirac (δ) e de um termo residual que pode ser desprezado (Joseph e Wiscomb, 1976; Mo et al., 1982).

A figura 2.2 ilustra a aproximação "Delta-Eddington" para o termo de difusão múltipla das equações de transferência radiativa.

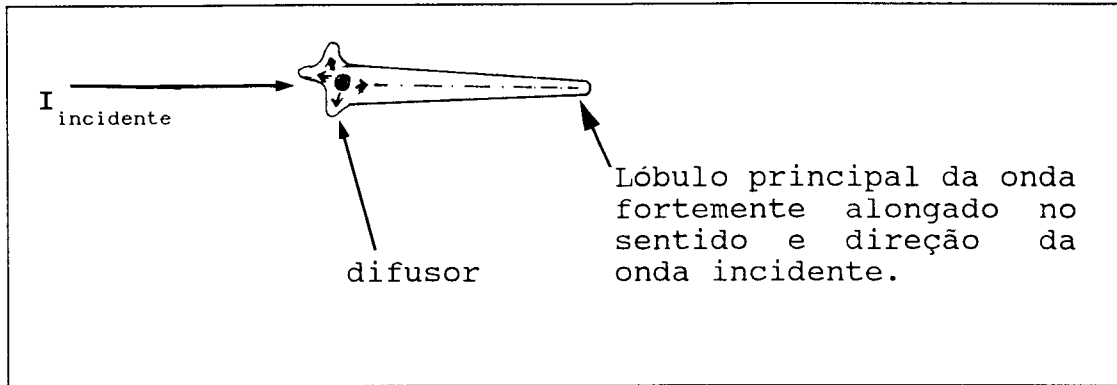


Fig. 2.2 - Representação da aproximação "Delta-Eddington" para o termo de difusão múltipla.

FONTE: Wigneron (1991a), p.5.

A partir da aproximação "Delta-Eddington", as equações de transferência radiativa podem ser escritas na forma simplificada e expressas por (Mo et al., 1982):

$$\frac{\mu dTB_v(\mu, \tau_v^*)}{d\tau_v^*} = -TB_v(\mu, \tau_v^*) + (1 - \omega_v^*) \cdot T_f(\tau_v^*), \quad (2.7a)$$

$$\frac{\mu dTB_h(\mu, \tau_h^*)}{d\tau_h^*} = -TB_h(\mu, \tau_h^*) + (1 - \omega_h^*) \cdot T_f(\tau_h^*), \quad (2.7b)$$

onde:

T_f = temperatura média do dossel da vegetação;

μ = co-seno do ângulo de incidência θ ;

TB_v = temperatura de brilho na polarização vertical;

TB_h = temperatura de brilho na polarização horizontal.

ω_p^* e τ_p^* são respectivamente o albedo e a espessura ótica equivalentes (com $p = v$ para a polarização vertical e $p = h$ para a polarização horizontal), expressos

por (Joseph e Wiscombe, 1976):

$$\omega_p^* = \frac{(1 - \alpha_p) \cdot \omega_p}{(1 - \alpha_p \omega_p)}, \quad (2.8)$$

$$\tau_p^* = (1 - \alpha_p \omega_p) \cdot \tau_p, \quad (2.9)$$

sendo:

- α = fração de difusão frontal;
- ω = albedo de espalhamento simples;
- p = subscrito que representa o tipo de polarização;
- τ = espessura ótica do meio, expressa por:

$$\tau = \int_0^z K_e dz'. \quad (2.10)$$

Formulando a hipótese de que a refletividade na interface vegetação-atmosfera é nula, a integração das Equações 2.7a e 2.7b decorre diretamente da temperatura efetiva da cobertura vegetal, que representa a radiância no topo da vegetação.

Considerando a cobertura vegetal com N_c estratos e a hipótese mencionada anteriormente, a equação de transferência radiativa pode ser escrita na forma analítica como (Calvet e Kerr, 1991):

$$TE_p = \exp(-\tau_{c_p}^*) T_{z_0 p} + (1 - \omega_p^*) \sum_{m=1}^{N_c} \exp(-(\tau_{c_p}^* + \dots + \tau_{(m+1)p}^*)) \cdot [1 - \exp(-\tau_{m_p}^*)] T_{f_m}, \quad (2.11)$$

onde:

τ_C = espessura ótica de cada estrato da vegetação;
 T_Z = contribuição do solo (emissão mais reflexão);
 m = número da camada do estrato da vegetação;
 N_C = número total de camadas do estrato da vegetação;
 TE = temperatura efetiva da cobertura vegetal;
 p = representa o tipo de polarização da onda.

Na equação anterior, o termo τ_{Cp}^* representa a espessura ótica de todas as camadas dos estratos e T_{ZOp} , a contribuição do solo, devido à sua emissão e a reflexão radiométrica da vegetação e das radiações atmosférica e extraterrestre.

2.1.4 - COMPONENTES DE RADIAÇÃO DETECTADAS POR UM SENSOR A BORDO DE SATÉLITE

A temperatura de brilho detectada por um sensor a bordo de satélite, rastreando a cobertura vegetal, é resultante das seguintes componentes de radiação:

- 1) emissão atmosférica ascendente;
- 2) emissão da superfície do solo, atenuada pela cobertura vegetal;
- 3) emissão atmosférica descendente e radiação do espaço, refletidas pela cobertura vegetal;
- 4) emissão ascendente do dossel atenuada pela atmosfera;
- 5) radiação emitida pela camada de vegetação, refletida pelo solo e atenuada pela vegetação e atmosfera.

A Figura 2.3 mostra as cinco componentes de radiação detectadas por um sensor a bordo de satélite, rastreando uma superfície coberta por vegetação.

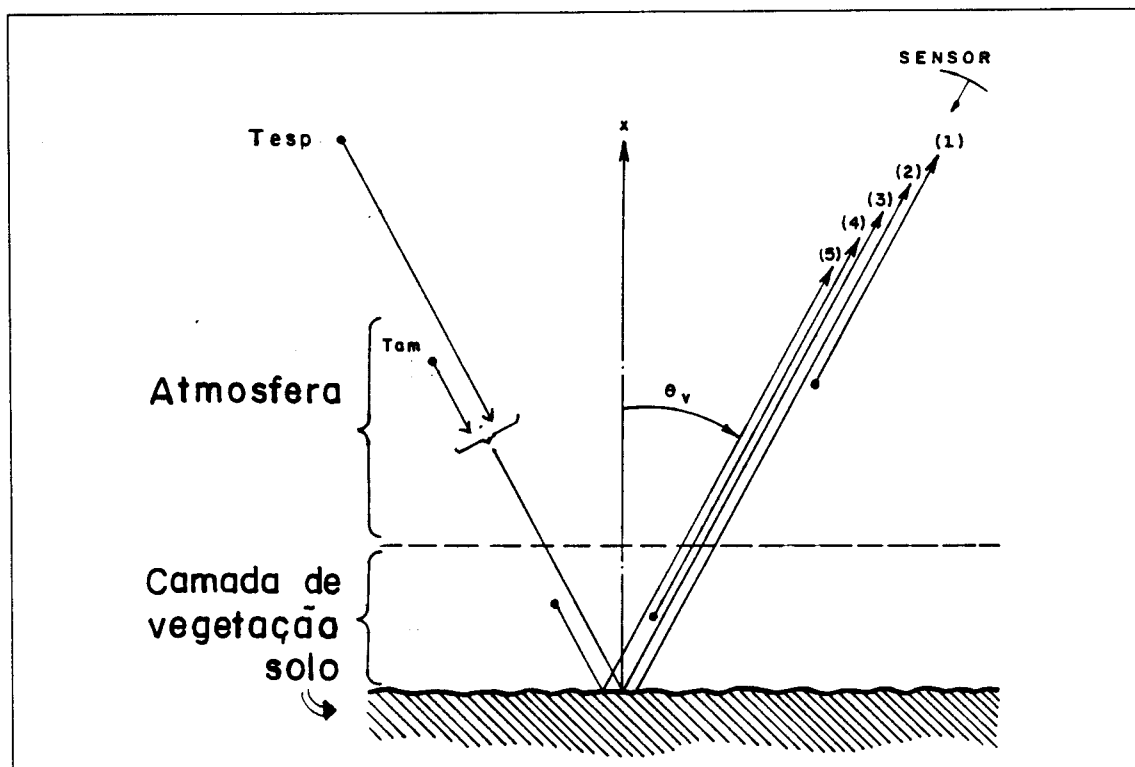


Fig.2.3 - Componentes de radiação detectadas por um sensor a bordo de satélite.

FONTE: Kerr e Njoku (1990), p.386

Segundo Kerr e Njoku (1990), as componentes de radiação atmosférica (1) e (3) são dependentes do perfil vertical de temperatura, constituintes gasosos e gotículas na atmosfera. Esses efeitos são pequenos para a região de microondas do espectro eletromagnético, permitindo observações de feições da superfície, com interferência consideravelmente pequena em relação aos valores encontrados, quando utilizadas a região do visível ou a região do infravermelho do espectro eletromagnético, conforme mostram as Figuras 2.4 e 2.5.

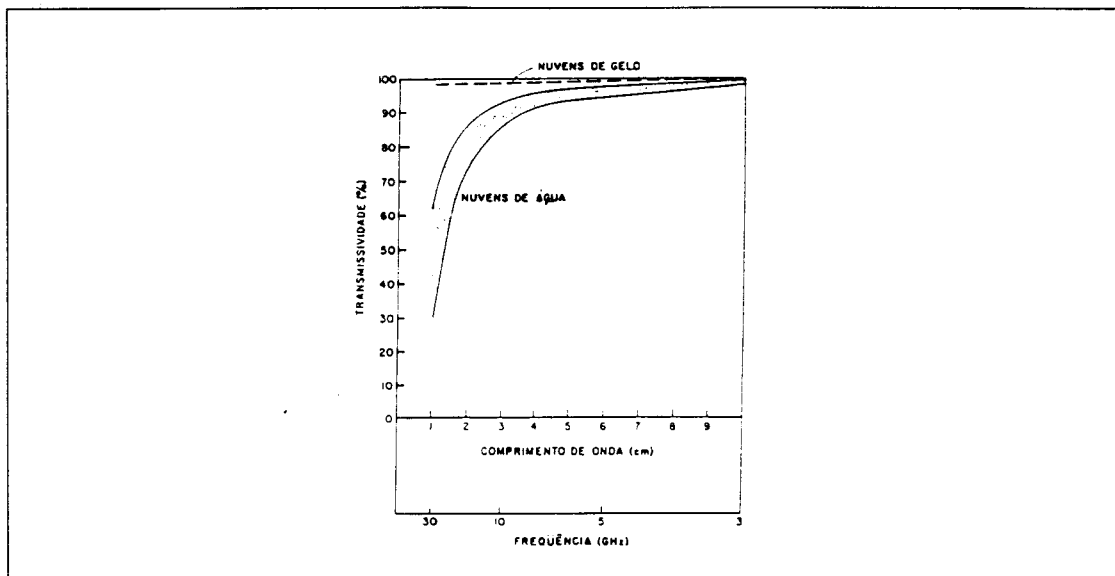


Fig 2.4 - Efeito de nuvens na transmissão de microondas do espaço para a superfície.

FONTE Ulaby et al., (1981), p.2.

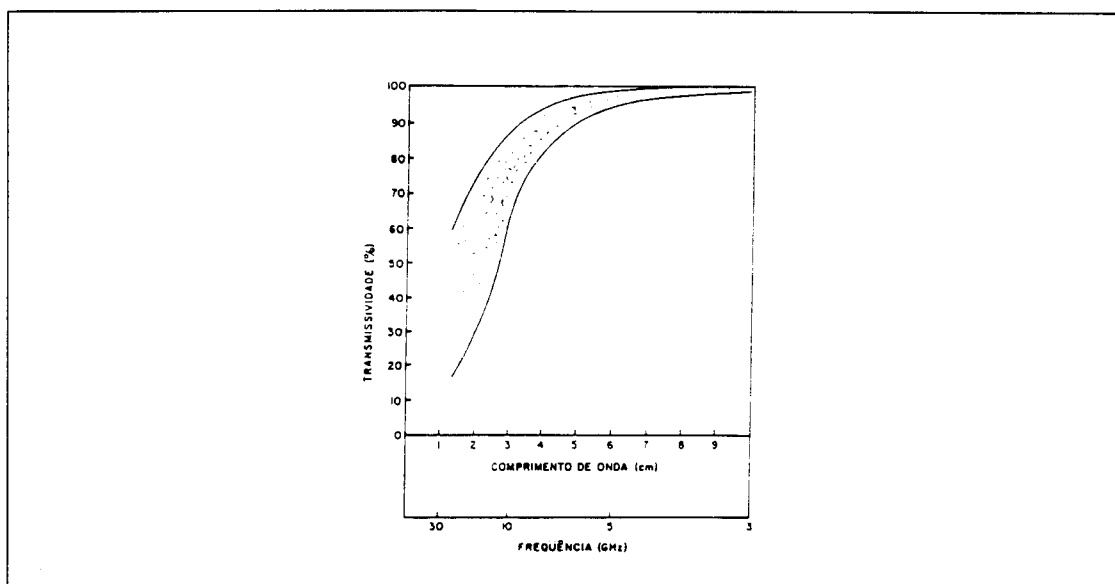


Fig 2.5 - Efeito da chuva na transmissão de microondas do espaço para a superfície.

FONTE Ulaby et al., (1981), p.2.

2.2 - MODELAGEM DA COBERTURA VEGETAL

A emissão térmica de superfícies vegetadas consiste na contribuição da camada de vegetação e do solo. A presença de vegetação causa atenuação da radiação emitida pela superfície do solo e espalhamento, tanto na radiação emitida pelo solo quanto na radiação emitida pela própria vegetação. O espalhamento e a absorção dos elementos da vegetação (folhas, galhos, troncos) dependem de suas propriedades dielétricas, de seus tamanhos e da direção do campo em relação à geometria dos elementos (Ulaby et al., 1982).

As propriedades dielétricas da vegetação são altamente dependentes do teor de umidade de seus elementos constituintes, conforme mostra a Figura 2.6.

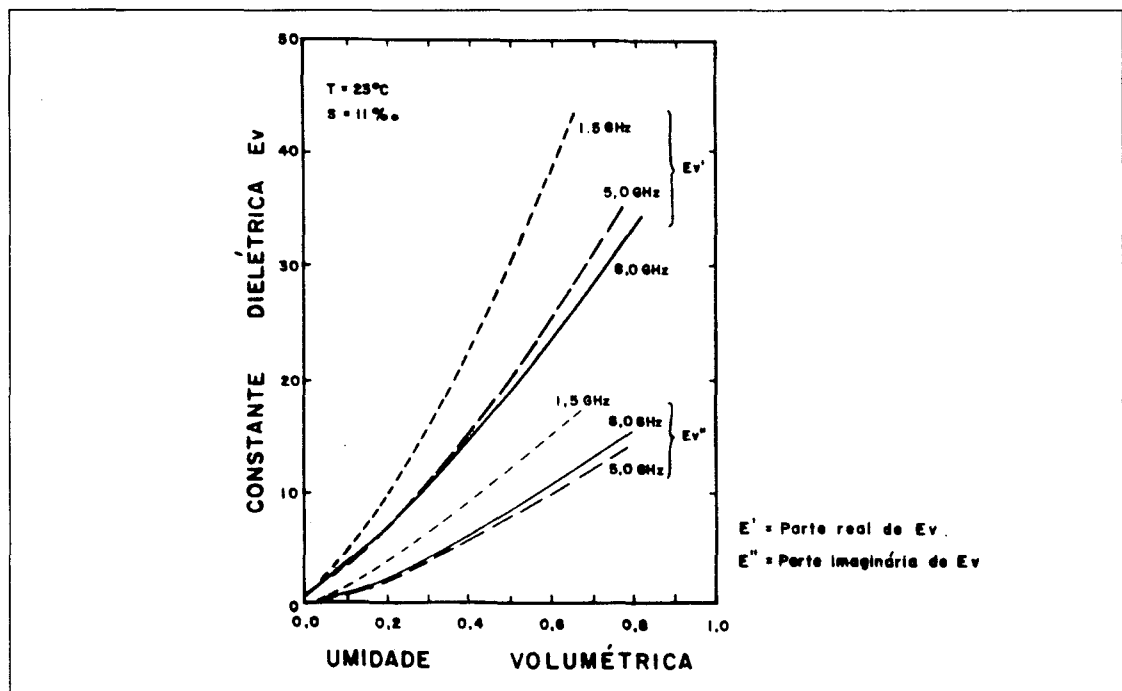


Fig 2.6 - Medida da dependência da constante dielétrica à umidade das folhas de milho.

FONTE: Ulaby et al. (1986.), p.2110.

Estimativas indicam que a profundidade de penetração de microondas no dossel vegetal é da ordem de vários metros para a frequência de 1 GHz e que ela diminui para valores em torno de 1 m para a frequência de 10 GHz. Os fatores que governam a profundidade de penetração numa dada frequência incluem a geometria, o conteúdo de umidade e de biomassa dos dossel da vegetação. No caso do solo, a profundidade de penetração de microondas, para uma dada frequência, depende de suas características físicas e de sua umidade (Ulaby et al., 1986).

2.2.1 - MODELOS DE DIFUSÃO DE VOLUME

Na abordagem mais elaborada do sinal de microondas emitido pela cobertura vegetal, faz-se necessário considerar, por completo, o termo de difusão de volume da equação de transferência radiativa (Equações 2.6a e 2.6b). Os modelos de difusão de volume podem ser divididos em quatro grande categorias (Wigneron, 1991a; Isaacs et al., 1989):

a) Quanto ao tipo de abordagem dividem-se em:

- **Abordagem coerente (Wave approach):** Considera ao mesmo tempo a amplitude e a fase da onda eletromagnética.
- **Abordagem incoerente (Transferência radiativa):** Considera apenas a amplitude da onda eletromagnética. Esta abordagem é justificada pelo fato de que o meio (estrato da vegetação) compreende um grande número de difusores com dimensões comparáveis ao comprimento de onda.

b) Quanto ao meio de propagação dividem-se em:

- **meio contínuo:** caracterizado pela permissividade aleatória ϵ_t , expressa por (Tsang e Kong, 1981):

$$\epsilon_t(r) = \epsilon_m + \epsilon_f(r), \text{ com } \langle \epsilon_f(r) \rangle = 0, \quad (2.12)$$

onde:

ϵ_m = permissividade média;
 $\epsilon_f(\bar{r})$ = valor médio da função de autocorrelação.

- **meio discreto:** Os elementos difusores da vegetação (troncos, galhos e folhas) se distribuem aleatoriamente dentro de cada substrato da vegetação.

Para simular o sinal emitido pela cobertura vegetal, modelos contínuos e discretos tem sido desenvolvidos (Isaacs et al, 1989; Mo et al, 1982). Esses modelos calculam a temperatura de brilho da vegetação.

Nos modelos contínuos, a cobertura vegetal é caracterizada por uma estrutura tridimensional, sendo que a emissão da vegetação é modelada estatisticamente através das flutuações da permissividade da camada de vegetação. As variações na permissividade da camada são descritas pela função de autocorrelação ϵ_f , dada por (Tsang e Kong, 1985):

$$\langle \epsilon_f(r) \cdot \epsilon_f(r') \rangle = \delta (\epsilon_m)^2 \exp \left[(-|z - z'|/L_z - (|x - x'|^2 + |y - y'|^2)/L_\rho^2) \right]. \quad (2.13)$$

Essa função de autocorrelação é representada por uma gaussiana na direção horizontal (caracterizada por um comprimento de correlação horizontal L_ρ) e por uma exponencial na direção vertical (caracterizada por um comprimento de correlação vertical L_z). δ é o termo da variância da permissividade. L_ρ , L_z e δ são dependentes do tamanho, formato e orientação dos elementos difusores.

Se os difusores são esféricos, o comprimento de correlação é aproximadamente igual ao raio. Para uma cultura como o milho, por exemplo, L_z é maior que L_ρ devido a estrutura do dossel ser predominantemente vertical. Quando o meio tem uma estrutura orientada, predominantemente, na direção horizontal, L_ρ tende ao infinito (Isaacs et. al, 1989).

Nos modelos discretos, a vegetação é caracterizada como uma coleção de difusores discretos (folhas, galhos, troncos), representados nominalmente por duas formas básicas: cilindros dielétricos com raio e tamanho variáveis para os troncos e galhos; pequenos elipsóides dielétricos para as folhas (Karam et al., 1988; Mougín et al., 1990). Esses modelos utilizam as características geométricas e a densidade de cada bioelemento da vegetação para o cálculo dos coeficientes de extinção e difusão da equação de transferência radiativa (Karam e Fung, 1988).

2.2.2 - CÁLCULO DA MATRIZ DE FASE PARA MEIOS DISCRETOS

O cálculo da matriz de fase para meios discretos pode-se ser feito utilizando-se os parâmetros de Stokes. Esta abordagem é descrita a seguir.

Considerando-se uma dada onda plana polarizada elipticamente, que se propaga através de um ângulo sólido $d\Omega$ num meio com impedância intrínseca η , onde \hat{v} e \hat{h} são os vetores unitários para polarização vertical e horizontal respectivamente, os parâmetros de Stokes I_v , I_h , U e V são definidos como (Ishimaru, 1978; Ulaby et al., 1986):

$$I_v d\Omega = \langle |E_v|^2 \rangle / \eta, \quad (2.15a)$$

$$I_h d\Omega = \langle |E_h|^2 \rangle / \eta, \quad (2.15b)$$

$$U d\Omega = 2 \operatorname{Re} \langle (E_v \cdot E_h) \rangle / \eta, \quad (2.15c)$$

$$V d\Omega = 2 \operatorname{Im} \langle (E_v \cdot E_h) \rangle / \eta, \quad (2.15d)$$

onde I_s é a intensidade do campo difuso, definida por:

$$I_s = (1/r^2) \cdot \mathbf{M} I_i, \quad (2.16)$$

onde:

I_i = intensidade incidente;

r = distância entre o objeto difusor e o ponto de observação;

\mathbf{M} = matriz de Stokes, dada por (Ulaby et al., 1986):

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} |S_{vv}|^2 & |S_{vh}|^2 \\ |S_{hv}|^2 & |S_{hh}|^2 \end{bmatrix}. \quad (2.17)$$

A partir das Equações 2.16 e 2.17, pode-se escrever a matriz de fase (\mathbf{P}) na forma simplificada, expressa por (Ulaby et al., 1986):

$$\mathbf{P} = 4\pi\langle\mathbf{M}\rangle / (A \cos\theta_s), \quad (2.18)$$

onde:

A = área da superfície rugosa iluminada;

θ_s = ângulo de incidência da onda difusa;

\mathbf{M} = Matriz de Stokes.

2.2.3 - CÁLCULO DA MATRIZ DE FASE PARA MEIOS CONTÍNUOS

Tsang e Kong (1976) desenvolveram o cálculo da matriz de fase para meios contínuos, onde o meio é caracterizado pela função de autocorrelação da permissividade, descrita pela Equação 2.12. Os autores utilizaram a hipótese da aproximação de Born para um meio com flutuações dielétricas e descreveram os elementos da matriz de fase como:

$$\begin{aligned} (v, v') = Q(\theta, \theta') e^{-w} \{ & [\text{sen}^2\theta \text{sen}^2\theta' + 1/2 \cos^2\theta \cos^2\theta'] J_0(w) \\ & + 2 \text{sen}\theta \text{sen}\theta' \cos\theta \cos\theta' J_1(w) \\ & + 1/2 \cos^2\theta \cos^2\theta' J_2^2(w) \}, \end{aligned} \quad (2.19a)$$

$$(v, h') = Q(\theta, \theta') \cdot e^{-w} \cdot \cos^2\theta \cdot 1/2 \{ [J_0(w) - J_2(w)] \}, \quad (2.19b)$$

$$(h, v') = Q(\theta, \theta') e^{-w} \cos^2\theta' 1/2 [J_0(w) - J_2(w)], \quad (2.19c)$$

sendo w e Q dados por:

$$w = (k^2 L_\rho / 2) \cdot \text{sen}\theta \cdot \text{sen}\theta'; \quad (2.20)$$

$$Q(\theta, \theta') = (\delta k^4 L_\rho^2 / 4) \{ L_z / [1 + k^2 L_z^2 (\cos\theta - \cos\theta')^2] \cdot (\exp(-(k^2 L_\rho^2 / 4) (\text{sen}\theta - \text{sen}\theta')^2)) \}. \quad (2.21)$$

$J_0(w)$, $J_1(w)$ e $J_2(w)$ representam a função de Bessel modificada de ordem zero, um e dois respectivamente.

2.2.4 - CÁLCULO DOS COEFICIENTES DE DIFUSÃO, ABSORÇÃO E EXTINÇÃO

O cálculo dos coeficientes de difusão, absorção e extinção, a partir dos componentes da matriz de fase, pode ser feito de diversas formas. Os principais métodos são descritos a seguir.

2.2.4.1 - CÁLCULO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO

A seção transversal de difusão de um objeto σ_s na polarização p é definida como a superfície difusora que produz uma potência difusa total em todo o espaço, dada por (Ulaby et al., 1986):

$$\sigma_{sp} = (1/4\pi) \int_{4\pi} \sigma_p d\Omega_s \quad (\bar{m}^2), \quad (2.22)$$

onde:

Ω = ângulo sólido (Sr).

A partir da Equação 2.21, define-se o coeficiente de difusão K_s como (Tsang e Kong, 1976):

$$K_s = N \cdot \sigma_s \quad (\text{m}^{-1}), \quad (2.23)$$

sendo N o número de elementos difusores por unidade de volume.

Considerando os coeficientes da função fonte para difusão $((v, v'), (v, h'), (h, v'), (h, h'))$, o coeficiente de difusão pode ser escrito como (Tsang e Kong, 1976):

$$K_{sv}(\theta) = \int_0^\pi d\theta' \text{sen}\theta' \{ (v', v) + (h', v) \}, \quad (2.24a)$$

$$K_{sh}(\theta) = \int_0^\pi d\theta' \text{sen}\theta' \{ (v', v) + (h', v) \}, \quad (2.24b)$$

2.2.4.2 - CÁLCULO DO COEFICIENTE DE EXTINÇÃO

O coeficiente de absorção na polarização p é definido por (Tsang e Kong (1975)):

$$K_{ap} = 2K_0 |\text{Im}(\epsilon_{mp})^{1/2}| \quad (\text{m}^{-1}), \quad (2.25)$$

onde:

ϵ_m = permissividade relativa média;

K_0 = número de onda no vácuo;

Im = parte imaginária do número de onda no meio.

2.2.4.3 - CÁLCULO DO COEFICIENTE DE EXTINÇÃO

A maneira mais simples de se calcular o coeficiente de extinção (k_e), consiste em escrevê-lo como a soma dos coeficiente de absorção e extinção (Ulaby et al., 1981):

$$K_e = K_a + K_s. \quad (2.26)$$

O coeficiente de extinção também pode ser calculado a partir do teorema ótico, o qual relaciona a seção transversal de extinção σ_e com os componentes da matriz de difusão, calculada numa dada direção de incidência e definida por (Tsang e Kong, 1985):

$$\sigma_e = 4\pi / (k \cdot \text{Im}\{e_i \cdot F \cdot e_i\}) \quad (4.27)$$

com:

$$\sigma_{eV} = (4\pi/k) \cdot \text{Im}\{|f_{VV}(k_i, k_i)|\}, \quad (4.28)$$

$$\sigma_{eV} = (4\pi/k) \cdot \text{Im}\{|f_{VV}(k_i, k_i)|\}, \quad (4.29)$$

sendo:

F = matriz de difusão;
 f_{VV} = amplitude de difusão;
 k_i = vetor incidente.

Deste modo, o coeficiente de extinção (K_e) pode ser relacionado à seção transversal de extinção (σ_e) pela seguinte expressão:

$$K_e = N \cdot \langle \sigma_e \rangle \quad (\text{m}^{-1}), \quad (2.28)$$

onde:

N = número de difusores por unidade de volume (m^{-3});
 $\langle \rangle$ = média espacial sobre a distribuição dos difusores.

2.2.5 - RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA

As condições limite das equações de transferência radiativa 2.6a e 2.6b e o cálculo dos seus diferentes termos (P , K_e , K_s e K_a) são obtidos utilizando os métodos descritos a seguir (Wigner, 1991a):

- 1) **Método iterativo:** inicialmente calcula-se a solução de ordem zero para o sistema de equações de transferência radiativa (2.6a e 2.6b), que consiste em considerar termo fonte para difusão nulo ($P=0$). A solução de ordem 1 é obtida introduzido o termo de fase (P) na solução de ordem zero.
- 3) **Método numérico:** Consiste em transformar o sistema de equações diferenciais (2.6a e 2.6b) em sistemas diferenciais lineares e matriciais, a partir do método de quadratura de Gauss (Choe et al., 1983).
- 3) **Método "Matrix-Doubling":** Este método fornece uma forma alternativa para o cálculo das equações de transferência radiativa, onde a matriz de difusão

numa camada elementar, de espessura Δz , é relacionada à matriz de fase de primeira difusão (Eom e Fung, 1984).

CAPÍTULO 3

DADOS E METODOLOGIA

Para calcular o sinal de microondas emitido pela cobertura vegetal, foram utilizados dois tipos de modelos: contínuo e discreto. Esses modelos comportam parâmetros de entrada referentes à umidade, densidade e arquitetura do dossel vegetal, características físico-químicas do solo (textura, rugosidade, e salinidade) e temperatura das camadas do solo e da vegetação.

Os parâmetros de entrada nos modelos referentes à caracterização da cobertura vegetal e os dados micrometeorológicos foram obtidos a partir de experimentos realizados na Reserva Florestal Ducke, localizada a $02^{\circ}57'S$ de latitude e $59^{\circ}57'W$ de longitude.

Para proceder à inversão dos modelos utilizaram-se temperaturas de brilho (com polarização vertical e horizontal) obtidas pelo sensor SMMR.

3.1 - DESCRIÇÃO DOS MODELOS UTILIZADOS

Conforme apresentado no Capítulo 2, a modelagem do sinal de microondas emitido pela cobertura vegetal, segundo a descrição do meio, é desenvolvida em duas direções: modelos discretos e modelos contínuos.

Os modelos discretos permitem uma completa caracterização geométrica e dielétrica dos elementos da cobertura vegetal (folhas, troncos e galhos), enquanto os modelos contínuos utilizam uma descrição estatística do meio que descreve as flutuações da constante dielétrica no espaço.

O primeiro tipo de modelo possui a vantagem de considerar por completo, de maneira quantitativa a heterogeneidade da cobertura vegetal; porém necessita de muitos dados da estrutura e da arquitetura da vegetação; já o segundo tipo comporta poucos parâmetros, facilitando, assim, sua inversão (Calvet e Kerr, 1991). Os modelos aqui utilizados têm como variável de saída a temperatura de brilho com polarização vertical (TBv) e horizontal (TBh).

3.1.1 - MODELO DISCRETO

Neste trabalho está está sendo utilizado o modelo discreto simplificado, desenvolvido no "Centre d'Étude du Rayonnement Spatial" (CERS) por Mougín e Lopes (1990), e posteriormente adaptado por Calvet e Kerr (1991). O modelo está baseado nos elementos teóricos desenvolvidos por Karam e Fung (1988) e Karam et al. (1988).

Os princípios teóricos do modelo consideram a abordagem de meio discreto, apresentada no Capítulo 2. Para a integração da equação de transferência radiativa, o modelo utiliza as equações simplificadas (2.7a) e (2.7b).

Na Tabela 3.1 estão listados os valores de referência dos parâmetros da vegetação de entrada no modelo discreto, para Reserva Florestal Ducke.

TABELA 3.1 - PARÂMETROS DA VEGETAÇÃO DE ENTRADA NO MODELO DISCRETO

| SÍMBOLO | DEFINIÇÃO | VALOR | FONTE |
|--------------------------|--|-------------------------------------|--|
| H | Altura média do dossel | 35.0 m | Sellers et al (1989) |
| IAF | Índice de área foliar | 5.2 m ² .m ⁻² | Jordan e Uhl (1978) |
| DFmax | Altura de máxima densidade foliar | 28.2 m | Sellers et al (1989) |
| B(ν, μ, θ) | Distribuição Beta das folhas, com um θ satisfazendo a condição de $X_L=0.1$ | $\nu = 2.4$ $\mu = 1.6$ | Calvet e Kerr (1990) |
| d, e | Diâmetro medio e espessura das folhas | d=5cm, e=.4mm | * calibrado |
| ρ_f | Densidade de matéria seca de folhas | 330 Kg.m ⁻³ | Ulaby e El-Rayes(1987) |
| α, ν, α, h | Fração de difusão frontal | Tabela A.1 | * calibrado |
| β_0 (Nc) | Função densidade de probabilidade de inclinação das três classes de troncos e das três classes de galhos, de acordo com a função de densidade de probabilidade definida por Goel e Strebel (1984). | 0, 0, 0 | Valores obtidos por Calvet e Kerr (1990) a partir dos dados de Jordan e Uhl (1978) e Folster et al. (1976) |
| β_1 (Nc) | | 40, 60, 60 | |
| β_2 (Nc) | | 0, 0, 0 | |
| m(Nc) | 10, 30, 30 | | |
| rb(Nc) | 10, 20, 3 | | |
| db(Nc) | 70, 90, 90 | | |
| | Fator de forma para as seis classes classes de troncos e galhos | 4, 3, 1 2, 1, 1 | |
| | Raio das seis classes de troncos e galhos. | .19 .08 .02 .10 .04 .02 | |
| | Meio comprimento das seis classes de troncos e galhos | 11.9, 8.4, 3.25 5.0, 2.25, .90 | |

3.1.2 - MODELO CONTÍNUO

Este tipo de modelo baseia-se na abordagem de meio contínuo, desenvolvida por Tsang e Kong (1976, 1980, 1981 e 1985), cujos princípios teóricos foram apresentados no Capítulo 2. O modelo utilizado foi desenvolvido no "Laboratoire d'Etude et de Recherche en Télédétection Spatiale" (LERTS) por Wigneron (1991b).

Neste modelo, a integração da equação de transferência radiativa é feita de maneira numérica, utilizando o método numérico de quadratura de Gauss (Tsang e Kong, 1976 e 1980).

Na modelagem de meio contínuo, a configuração geométrica da cobertura vegetal é representada por um meio aleatório de duas camadas, conforme mostra a figura abaixo.

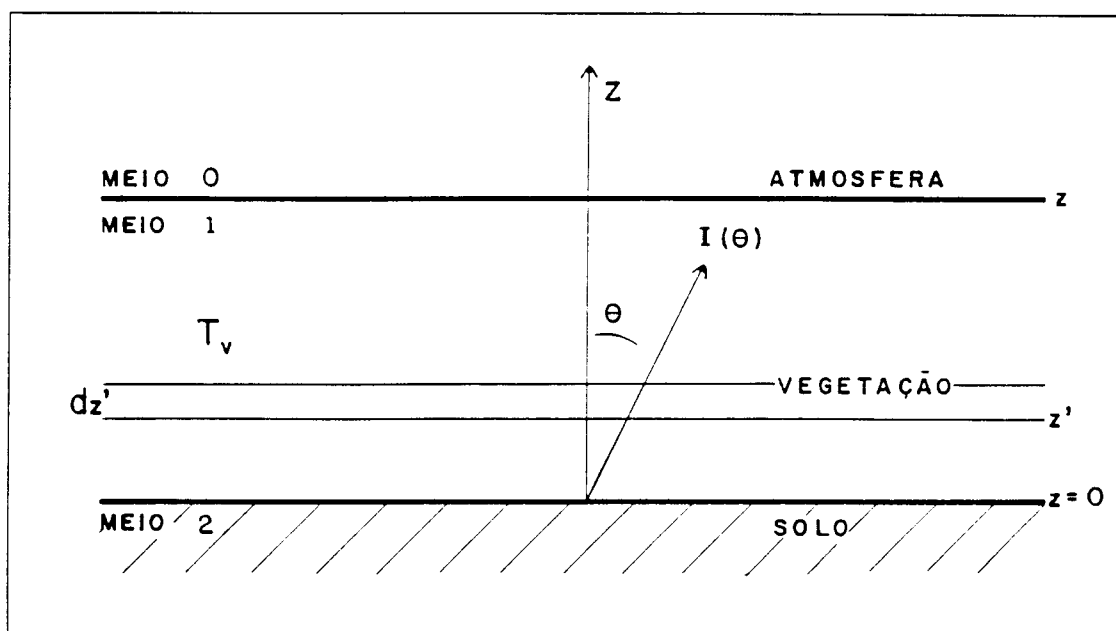


Fig. 3.1 - Configuração geométrica do meio aleatório com duas camadas.

FONTE: Chuang et al. (1980), p.5558.

A Figura 3.2 mostra o método de resolução do sistema de equações de transferência radiativa para o modelo contínuo, desenvolvido por Tsang e Kong (1980).

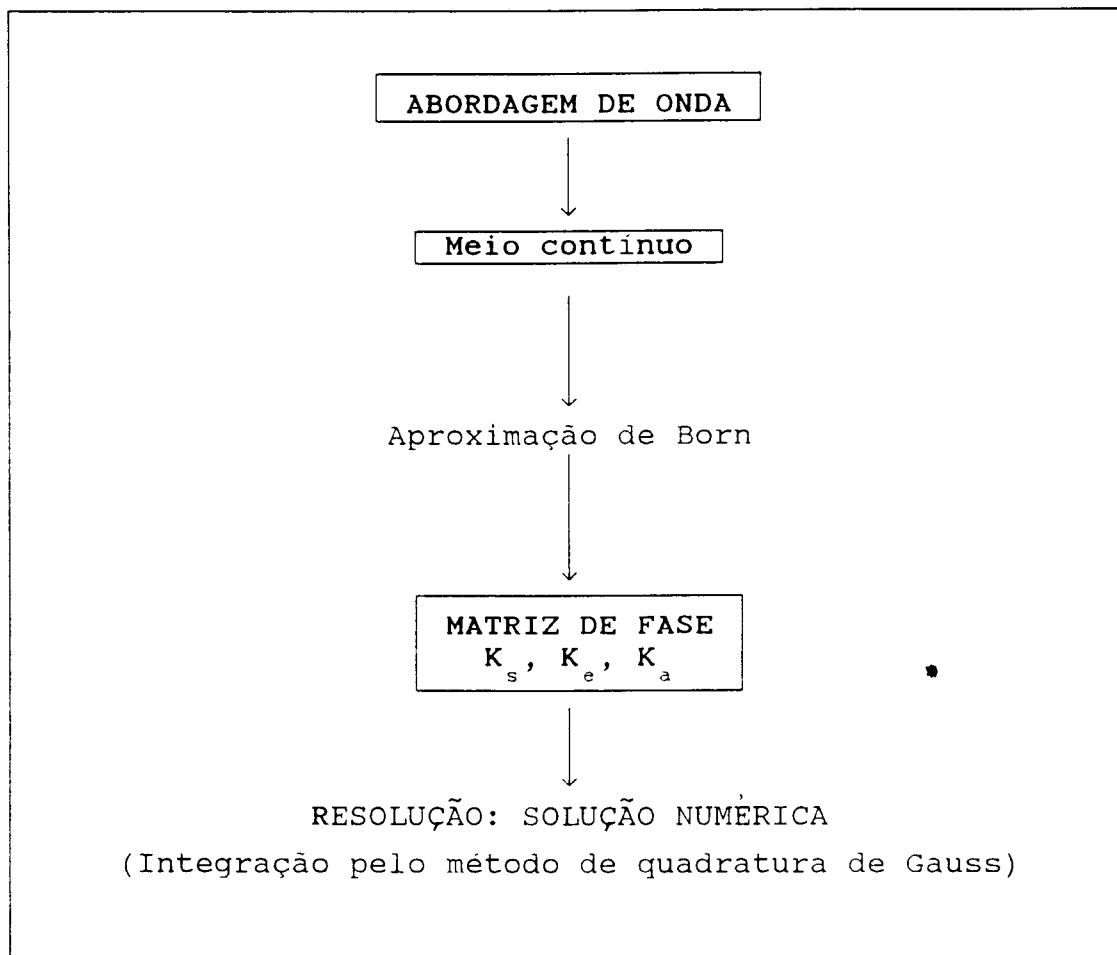


Fig. 3.2 - Método de resolução do sistema de equações de transferência radiativa utilizado no modelo contínuo.

FONTE: Adaptada de Wigneron (1991a), p.10.

A Tabela 3.2 apresenta os valores de referência dos parâmetros da vegetação de entrada modelo contínuo, para a Reserva Florestal Ducke.

TABELA 3.2 - PARÂMETROS DA VEGETAÇÃO DE ENTRADA NO MODELO CONTÍNUO

| SIMB. | DEFINIÇÃO | VALOR | FONTE |
|----------|------------------------|---------|---------------------|
| H | Altura média do dossel | 35.00m | Sellers et al.1987) |
| U_v | Umidade em peso | Tab 4.1 | Valor calibrado |
| f_v | Fração volumétrica | 173 ppm | Valor calibrado |
| L_z | Comprim. de correlação | Tab.4.1 | Valores calibrados |
| L_ρ | vertical e horizontal | | |

* Parâmetros da vegetação cujos valores são obtidos a partir da inversão do modelo contínuo.

A Tabela 3.3 apresenta os valores dos parâmetros do solo de entrada nos modelos discreto e contínuo, para a Reserva Florestal Ducke.

TABELA 3.3 - PARÂMETROS DO SOLO DE ENTRADA NO MODELOS CONTÍNUO E DISCRETO

| SIMB. | DEFINIÇÃO | VALOR | FONTE |
|----------|-----------------------|-------------------------------------|--|
| clay | porcentagem de argila | 78.0 % | Obtidos por Cabral (1991), na Reserva Floresta Ducke em 1985, para a profundidade de 10cm. |
| sand | Porcentagem de silte | 12.0 % | |
| clay | porcentagem de areia | 10.0 % | |
| ρ_s | densidade global | .85 g/cm ³ | Kerr e Njoku (1990) |
| U_s | umidade volumétrica | .4 cm ³ /cm ³ | |
| h | rugosidade eletromag. | .1 | |

Utilizou-se os valores dos parâmetros do solo para a profundidade de 10.00 cm porque segundo Ulaby et al. (1981), esta a é máxima profundidade de penetração no solo da radiação de microondas nas frequências utilizadas.

3.2 - DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Os dados de campo foram obtidos na Reserva Florestal Ducke, situada aproximadamente a 25 km a leste de Manaus. Como a resolução média espacial dos "pixels" é baixa (55.6 km x 55.6 km), o pixel da temperatura de brilho que cobre a área da Reserva Florestal Ducke apresentou-se contaminado por superfícies de água. Para contornar este problema, utilizou-se o valor médio dos "pixels" não contaminados. Os dados SMMR utilizados cobrem uma área de 334 x 278 km, delimitada pelas coordenadas de latitude 00° 00'S a 03° 00'S e de longitude 57° 30'W a 60° 00'W (Figura 3.3).

A Reserva Florestal Ducke tem área de aproximadamente 10.000 ha, estando encravada em sedimentos terciários da série barreiras, na porção central da floresta Amazônica. O relevo é caracterizado como ondulado e com cota máxima de 100 m. A cobertura vegetal é do tipo floresta de terra firme, com copas que possuem uma altura média de 35 m. Os solos da região são do tipo latossolo amarelo, de textura muito pesada, muito profundos e fortemente intemperizados, bem drenados e com teor de argila sempre superior a 70% (Forti, 1989).

A Figura 3.4 mostra um mosaico da área de estudo, composto por imagens TM/Landsat na banda 5, obtidos entre 1986 e 1989. Ela demonstra que a quantidade de desmatamento na área de estudo é muito pequena. Além disso, o reservatório de Balbina que aparece na Figura 3.4 ainda não existia na época do estudo.

Na Figura 3.5 estão representadas as regiões fitoecológicas da área de estudo, onde pode ser observado que quase toda área é coberta por floresta ombrófila densa (de terras baixas e submontana).

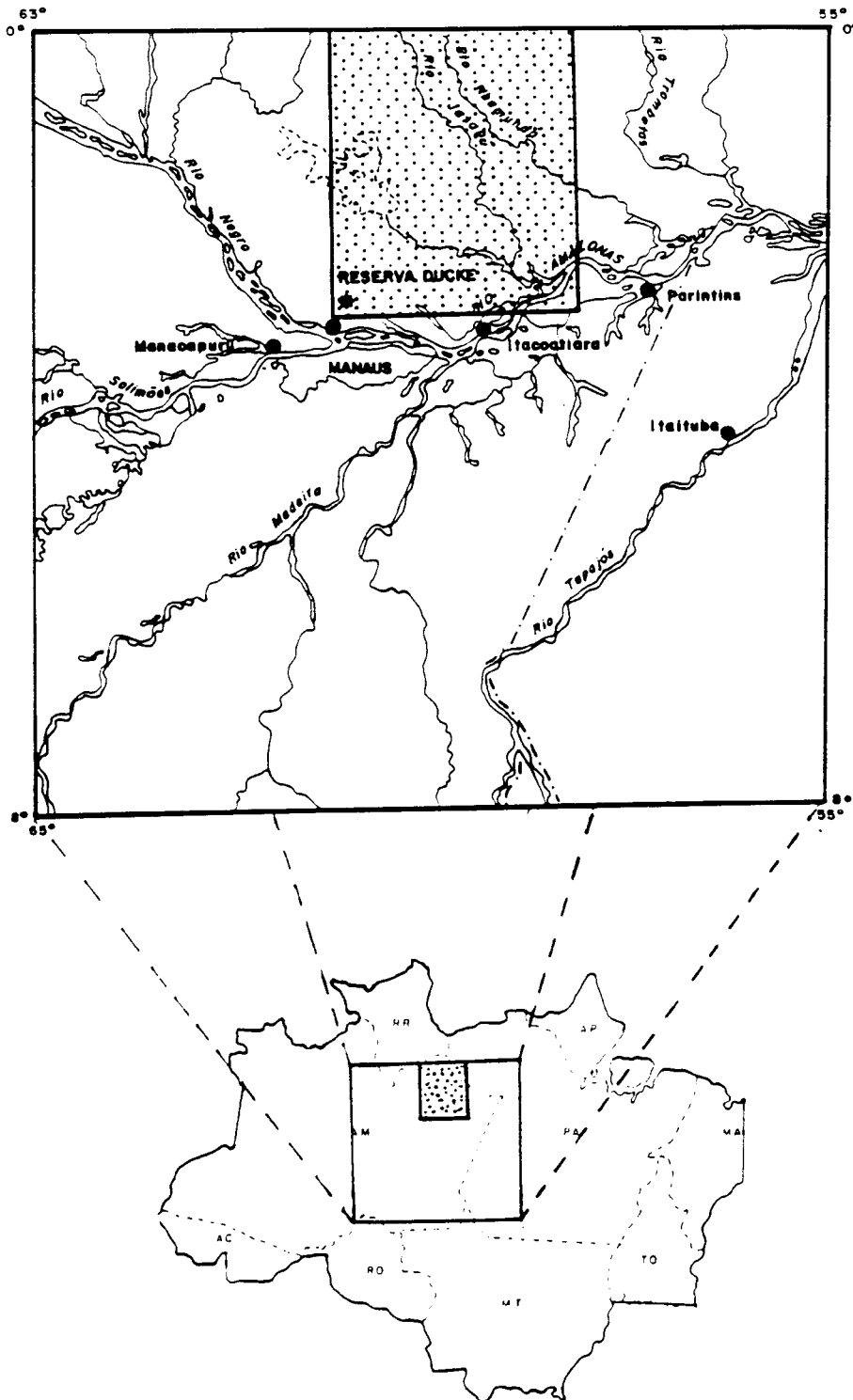


Fig. 3.3 - Mapa de localização da área de estudo (hachurada).

FONTE: Adptada de Projeto RADAMBRASIL (1976).

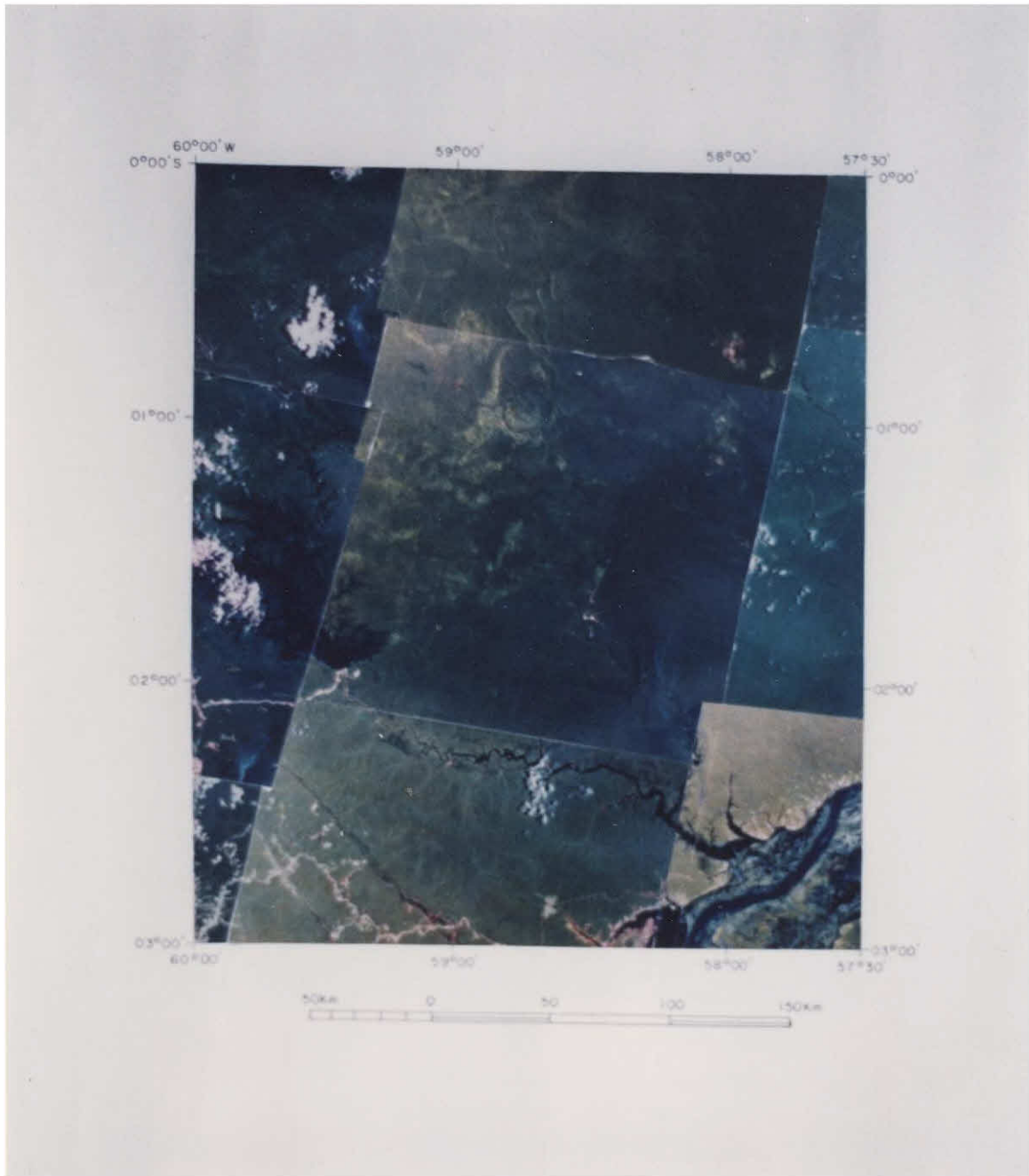


Fig 3.4 - Mosaico de imagens TM/Landsat, bandas 3, 4 e 5, obtidas entre 1986 e 1989.

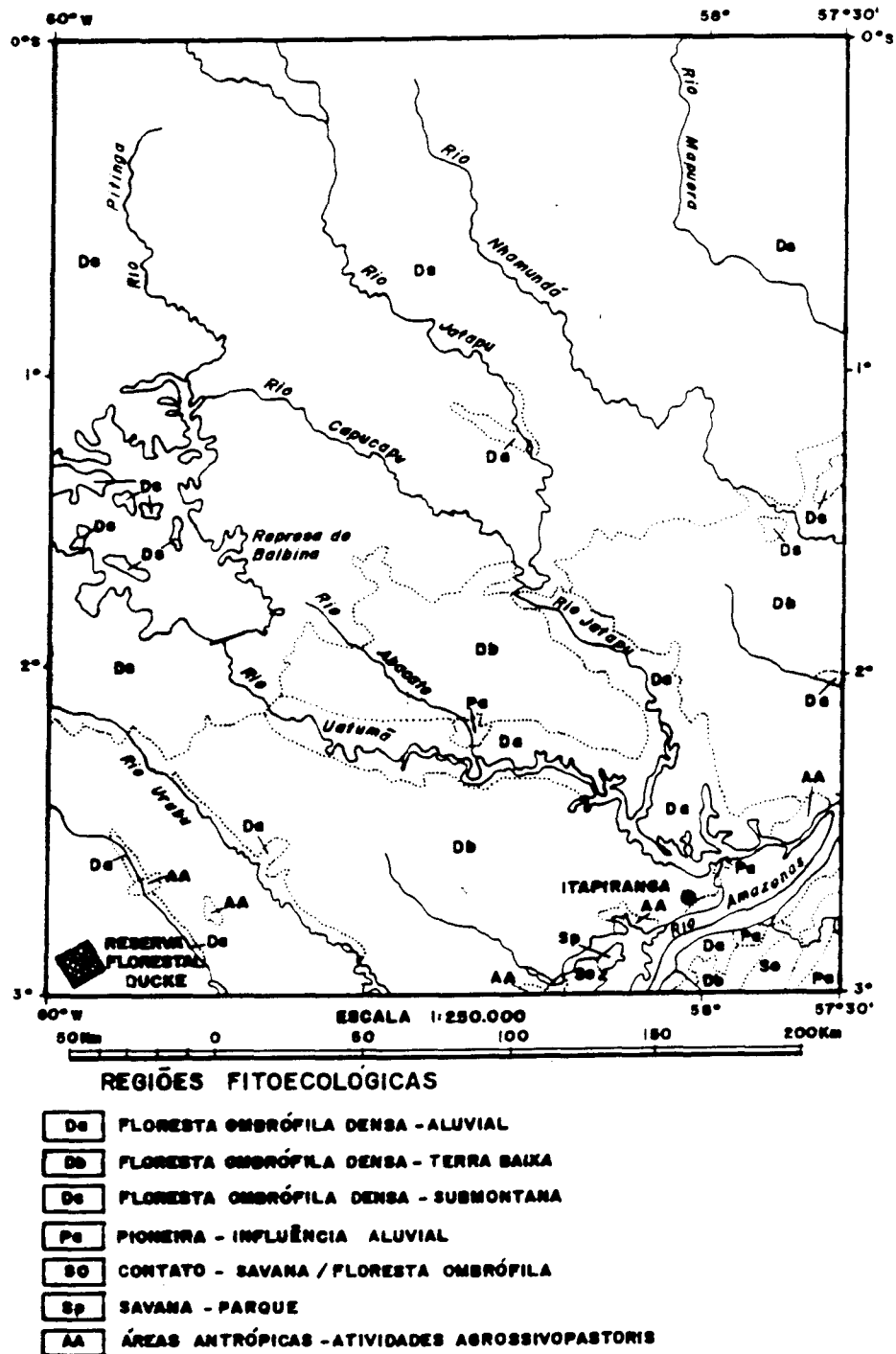


Fig 3.5 - Mapa de vegetação da área de estudo com as regiões fitoecológicas.

FONTE: Adaptada de IBGE (1990).

3.3 - DADOS ORBITAIS

O satélite Nimbus 7 foi o último da série Nimbus, lançado em 1978, em órbita com altitude média de 954 km, ângulo de inclinação de 99.2° em relação ao equador e período de 104 minutos. Sua órbita heliossíncrona, cruza o Equador ao meio-dia (órbita ascendente) e a meia-noite (órbita descendente), com um ângulo de visada de 50.2° em relação ao nadir. O satélite levou a bordo doze instrumentos, incluindo o sensor SMMR.

3.3.1 - O SENSOR SMMR

O sensor SMMR foi projetado originalmente para fornecer dados sobre a temperatura da superfície do mar, conteúdo de água das nuvens, precipitação, cobertura de neve e gelo no mar. Esse sensor mede a temperatura de brilho emitida pela superfície terrestre e pela atmosfera, operando em cinco frequências, com duas polarizações, isto é, vertical e horizontal (Kerr e Njoku, 1990). Na Tabela 3.3 estão listados os canais do sensor SMMR com suas frequências e respectivas resoluções espaciais no terreno.

TABELA 3.4 - FREQUÊNCIA E RESOLUÇÃO DOS CANAIS DO SENSOR SMMR

| CANAL | FREQUÊNCIA (GHz) | COMPR. DE ONDA (cm) | RESOLUÇÃO (Km) |
|-------|---------------------|------------------------|-------------------|
| 1-2 | 6.6 | 4.55 | 148x95 |
| 3-4 | 10.7 | 2.81 | 91x59 |
| 5-6 | 18.0 | 1.67 | 55x41 |
| 7-8 | 21.0 | 1.43 | 46x30 |
| 9-10 | 37.0 | 0.81 | 38x17 |

FONTE: Comiso e Zwally (1989), p.21.

3.3.2 - PROCESSAMENTO DOS DADOS SMMR

Apesar da resolução dos "pixels" no terreno ser diferente para todas as frequências, conforme mostrado na tabela 3.1, os dados SMMR utilizados, no de formato de fitas, apresentam uma resolução média dos "pixels" de $1/2^{\circ} \times 1/2^{\circ}$ (55.6 x 55.6 Km) para todas as frequências. Esses dados foram obtidos às 12:00 e 24:00 horas local, que são os horários de passagem do satélite Nimbus-7. Cada fita corresponde a uma única medida dentro de um período de seis dias, que é o período necessário para a cobertura global. As cartas na frequência de 21.0 GHz apresentaram problemas de correção e, por isso, não foram usadas.

Foram utilizados os dados orbitais referentes a dois períodos de 1985, correspondentes aos dias julianos 92 até o dia 138, para a estação úmida (períodos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 do SMMR), e do dia juliano 182 até o dia 240, para a estação seca (períodos 5, 6, 7, 8, 9 e 10 do SMMR), obtidos às 12:00 e 24:00 horas local. Esses períodos foram escolhidos levando em conta a disponibilidade dos dados micrometeorológicos.

Calvet e Kerr (1991) mostraram que existe uma forte contaminação dos "pixels" situados nas margens dos rios Negro e Solimões. Para selecionar os "pixels" contaminados, os autores utilizaram a razão de polarização (RP), definida por:

$$RP = (TBv - TBh)/(TBv + TBh) \quad (3.1)$$

Considerou-se como contaminados por superfícies de água os "pixels" que apresentaram a RP

superior a 0.015 nas quatro frequências (6.6, 10.7, 18.0 e 37.0 GHz). Para o cálculo das temperaturas de brilho média da área de estudo, foram utilizados apenas "os pixels" não contaminados por superfícies de água.

3.3.2.1 - CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DA TEMPERATURA DE BRILHO DA VEGETAÇÃO

Para a correção atmosférica das temperaturas de brilho, utilizou-se um programa computacional que tem como dados de entrada o conteúdo vapor d'água verticalmente integrado na atmosfera (IWC), a altura da base e do topo das nuvens, a densidade de água líquida da camada de nuvens e a taxa de precipitação. A descrição detalhada do método utilizado no programa para o cálculo da correção atmosférica é dada Hofer e Njoku (1981).

As medidas de precipitação foram obtidas durante os experimentos micrometeorológicos ABLE e ARME. O IWC, a altura do topo e da base da camada de nuvens foram determinados a partir de radiossondagens disponíveis obtidas durante o experimento ABLE-2A. Caso contrário, o IWC foi determinado a partir de dados climatológicos fornecidos por Kousky e Kagano (1981). Os valores de IWC variaram entre 49 e 51 mm durante a estação úmida e entre 36 e 46 mm durante a estação seca.

A estimativa média da altura da base das nuvens foi de 1680 m para as 24:00 horas local e 2000 m para as 12:00 horas local. A máxima espessura das nuvens foi estimada em 1850 m para as 24:00 horas local e 2130 m para às 12:00 horas local. Considerou-se o valor constante para a densidade de água líquida das nuvens de 0.80 g/cm^{-3} , que é um valor típico de nuvens *cumulus congestus*, ou seja, de nuvens de altitude média (Fraser e Gaut, 1975).

Após determinada as características atmosférica para os períodos de estudo, a temperatura de brilho efetiva da vegetação TE foi calculada a partir da temperatura de brilho TB detectada pelo sensor, utilizando a seguinte expressão:

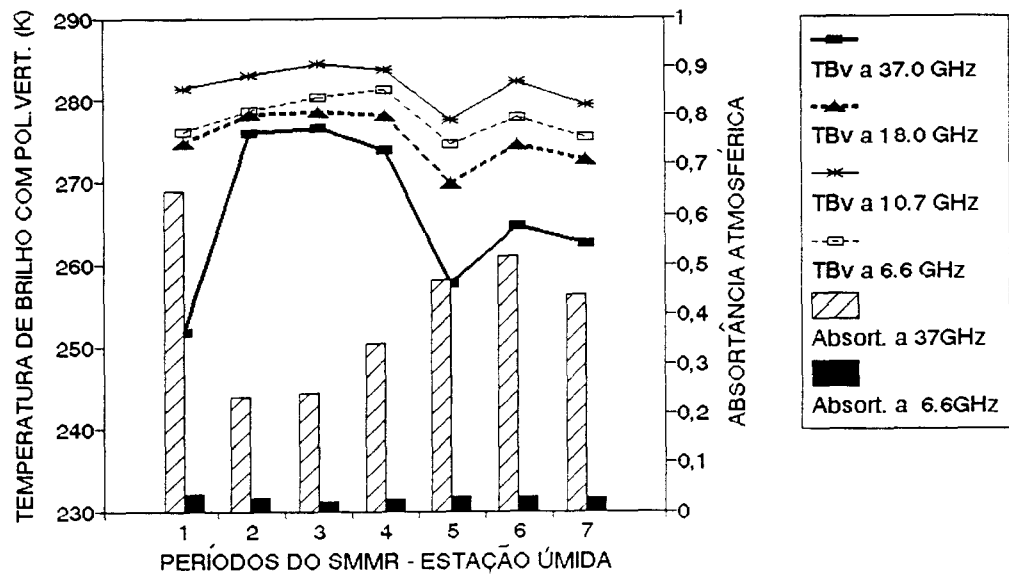
$$TE_p = (TB_p - T_{au}) \cdot \exp(\tau_{au}) \quad (3.2)$$

onde:

- p = tipo de polarização da onda (com v para a polarização vertical e h para a horizontal;
- T_{au} = temperatura resultante da emissão atmosférica ascendente;
- τ_{au} = opacidade atmosférica ascendente.

As Figuras 3.6a e 3.6b mostram os valores da temperatura de brilho da vegetação para as duas estações (úmida e seca) de 1985 às 12:00 horas local, obtida a partir da temperatura de brilho detectada pelo sensor e corrigida da emissão da atmosfera, de acordo com a Equação 3.2. Nessas figuras estão plotados também os valores de absortância atmosférica calculado através do programa computacional, mencionado anteriormente. Como esperado, a absortância calculada foi alta para a frequência de 37.0 GHz, diminuindo para valores próximos de zero para a frequência de 6.6 GHz.

a)



b)

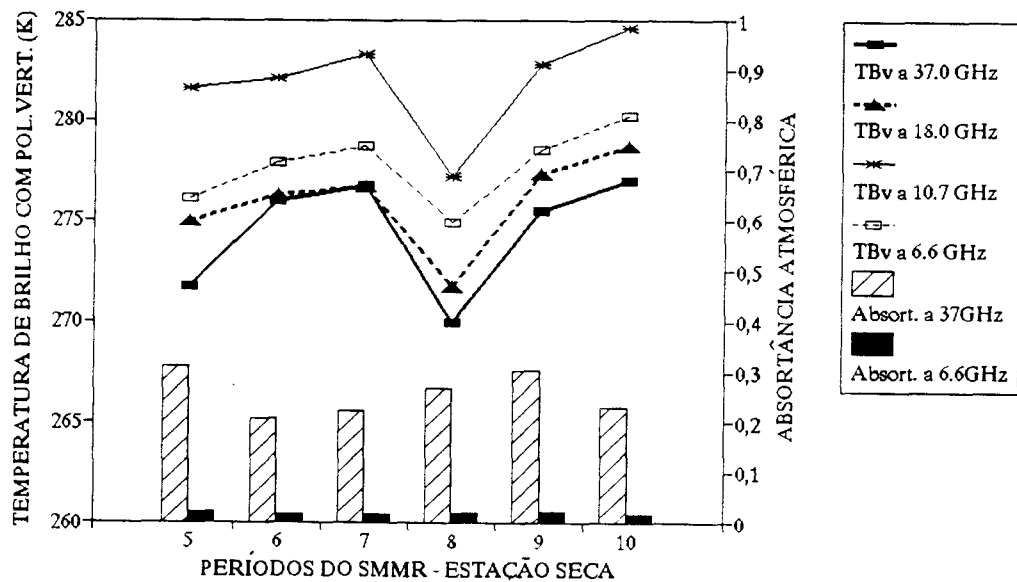


Fig 3.6 - Valores de temperatura de brilho da vegetação e de absorção atmosférica, calculados para as 12:00 horas local, durante as duas estações de 1985: a) estação úmida; b) estação seca.

3.4 - MEDIDAS MICROMETEOROLÓGICAS

As dados micrometeorológicos foram obtidos a partir de uma torre de 45.0 m de altura na Reserva Florestal Ducke pelos experimentos ARME (Shuttleworth et al., 1984; Sá et al., 1988), para o período úmido de abril/maio de 1985 e pelo experimento GTE/ABLE-2A (Viswanadham et al., 1990), para o período seco de julho/agosto de 1985. As medidas obtidas durante estes experimentos foram as seguintes:

- Medidas de 15 em 15 minutos da umidade e temperaturado do ar em quatro níveis: 1.45, 13.45, 23.25 e 30.51 m.

- Medidas horárias de radiação solar global incidente, de evaporação, fluxo de calor sensível, radiação líquida, déficit de vapor d'água do ar e precipitação, a 45,00 m da superfície do solo.

Dos dados listados acima, utilizou-se neste trabalho apenas os valores de temperatura do ar e precipitação medidas às 12:00 e 24:00 horas local, que são os horários de passagem do satélite.

3.5 - DADOS DA COBERTURA VEGETAL

Utilizaram-se os dados de campo referentes à biomassa e a estrutura da floresta de terra firme, obtidos de Carvalho Júnior (1991), Folster et al., (1976), Jordan e Uhl (1978) e McWilliam et al. (1992). Para a entrada desses dados nos modelos, o dossel da floresta foi dividido em quatro estratos de espessura coerente com o diâmetro dos troncos (Calvet e Kerr, 1991), conforme mostra a Figura 3.7.

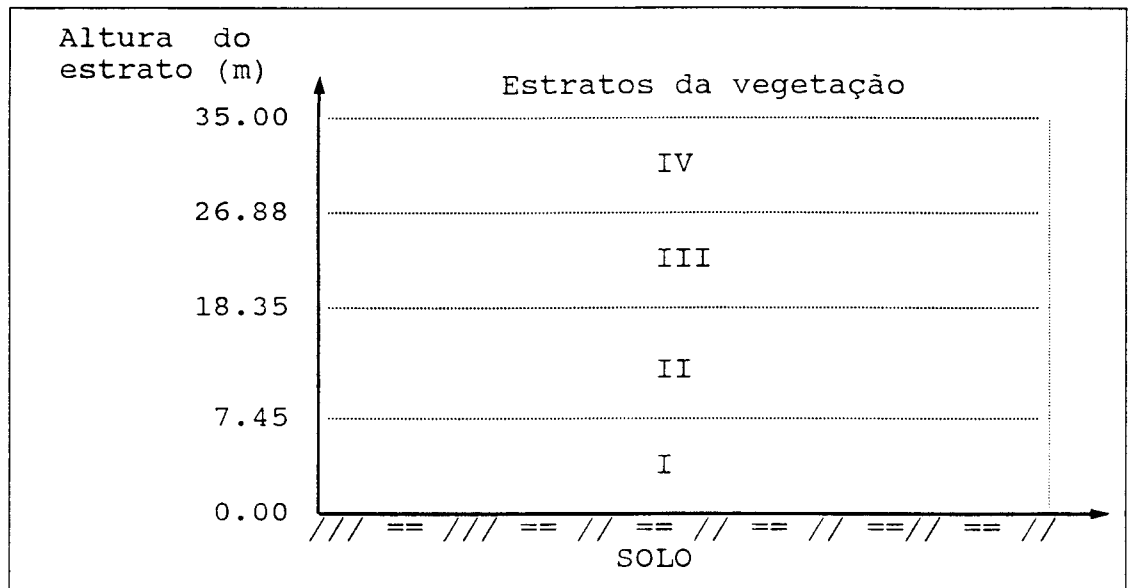


Fig. 3.7 - Espessura dos quatro estratos da vegetação.

3.5.1 - TRONCOS E GALHOS

Para a entrada no modelo discreto, utilizou-se a densidade de classes de troncos e a de galhos definidas por Calvet e Kerr (1991), (Tabelas 3.4 e 3.5).

TABELA 3.5 - CLASSES DE TRONCOS DA FLORESTA DE TERRA FIRME

| CLASSES DAP (cm) | D_e (cm) | H_e (m) | ESTRATOS | DENSIDADE ($N^0/.ha$) | MASSA ($kg.m^{-2}$) | VOLUME ($m^3.ha^{-1}$) |
|------------------|------------|-----------|----------|-------------------------|-----------------------|--------------------------|
| 3.5-10 | 4.0 | 6.5 | 1 | 2400 | 1.325 | 20 |
| 10-30 | 16.5 | 16.8 | 1-2 | 540 | 12.958 | 195 |
| ≥ 30 | 38.4 | 23.8 | 1-2-3 | 60 | 10.971 | 166 |
| TOTAL | | | | 3000 | 25.254 | 381 |

FONTE: Calvet e Kerr (1991), p.6.

D_e = Diâmetro efetivo da classe;

DAP = Diâmetro à altura do peito ($H = 1.30$ m);

H_e = altura efetiva da classe.

TABELA 3.6 - CLASSES DE GALHOS DA FLORESTA DE TERRA FIRME

| CLASSES D (cm) | D _e (cm) | L _e (cm) | ESTRATOS | DENSIDADE (N ⁰ /ha) | MASSA (kg.m ⁻²) | VOLUME (m.hã ¹) |
|----------------------|------------------------|------------------------|----------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1-5 | 3.7 | 1.8 | 1-2-3-4 | 7290 | 0.956 | 14 |
| 5-10 | 9.1 | 4.5 | 2-3-4 | 780 | 1.517 | 23 |
| 10-30 | 20.2 | 10.0 | 3-4 | 180 | 3.841 | 58 |
| TOTAL | | | | 8250 | 6.314 | 95 |

FONTE: Calvet e Kerr (1991), p.6.

D_e = Diâmetro efetivo da classe;

D = Diâmetro dos galhos;

H_e = Comprimento efetivo da classe.

A orientação de cada uma das três classes de troncos e de galhos foi definida considerando-se a seguinte distribuição (Calvet e Kerr, 1991):

$$P(\beta) = \cos^m(\pi/2) (\beta - \beta_0) / \left(\int_{\beta=\beta_1}^{\beta=\beta_2} \cos^m(\pi/2) (\beta - \beta_0) / (\beta_2 - \beta_0) d\beta \right), \quad (3.2)$$

onde β é o ângulo de inclinação em relação à vertical.

3.5.2 - FOLHAS

O valor do índice de área foliar adotado foi de 5.2 m².m² (Jordan et al., 1978; McWilliam et al., 1992).

Para descrever a orientação das folhas, utilizou-se a função densidade de probabilidade Beta, proposta por Goel e Strebel (1984).

3.6- ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS MODELOS

A função sensibilidade é definida como a taxa de variação de uma variável devido à variação de um ou mais parâmetros (McCuen, 1973).

O estudo de sensibilidade de modelos é importante porque indica quais os parâmetros de entrada do modelo têm maior influência nas variáveis de saída. Deste modo, pode-se, a partir da análise de sensibilidade, escolher os parâmetros de entrada que poderão ser obtidos através da inversão do modelo. Para o cálculo da função sensibilidade (ψ), utilizou-se a expressão (McCuen, 1973):

$$\psi = \frac{P}{F} \frac{\partial F}{\partial P}, \quad (3.3)$$

onde:

P = valor do parâmetro de entrada;

F = valor da variável de resposta;

∂P = incremento no parâmetro de entrada;

∂F = variação na variável de resposta devido ao incremento no parâmetro P.

Considerou-se um incremento de 1% nos parâmetro de entrada ($[\partial P/P]=0.01$) para o cálculo da sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical (TBv), temperatura de brilho, com polarização horizontal (TBh) e da razão de polarização (RP) ao parâmetro dado. Na Tabela 4.7 são mostrados os parâmetros cujo teste de sensibilidade foi aplicado e seus respectivos valores de referência para a floresta de terra firme, bem como os intervalos de variação de cada parâmetro.

TABELA 3.7 - PARÂMETROS DE ENTRADA NOS MODELOS PARA OS
QUAIS O TESTE DE SENSIBILIDADE FOI APLICADO

| PARÂMETRO | VALOR DE REFERÊNCIA | LÍMITES DO PARÂMETRO | |
|------------------------------|---------------------|----------------------|----------|
| | | INFERIOR | SUPERIOR |
| f_v ($m^3 \cdot m^{-3}$) | 173 ppm | 20 ppm | 200 ppm |
| IAF ($m^2 \cdot m^{-2}$) | 5.2 | 4.0 | 8.00 |
| U_v (Kg/Kg) | Tab. 4.1 | 0.30 | 0.80 |
| U_f (Kg/Kg) | Tab. A.1 | 0.60 | 0.90 |
| ΔT (K/m) | 0.15 | 0.00 | 0.28 |
| T_{inf} (K) | 301.5 | 296.00 | 306.00 |

3.7 - INVERSÃO DOS MODELOS

A inversão do modelo, consiste na minimização da função E, definida como o erro entre as temperaturas de brilho simuladas pelo modelo e as temperaturas de brilho da vegetação calculada a partir dos dados SMMR/Nimbus-7, expressa por:

$$E = \left[\frac{(TB_v - TB_v)^2 + (TB_h - TB_h)^2}{2} \right] (K)^2. \quad (3.4)$$

Considerou-se a condição do erro E ser menor ou inferior a 0.5 K, como critério para parada do processo de minimização da função. Para a minimização da função E, foram utilizados os métodos de minimização de funções descritos abaixo (Press et al., 1990):

- Método de Brent: faz a minimização de uma função de uma variável (unidimensional).
- Método de Powell: faz a minimização de uma função de mais de uma variável (multidimensional).

CAPÍTULO 4RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões referentes à umidade e à temperatura da vegetação, obtidas a partir da inversão do modelo contínuo. Inicialmente fez-se a calibração dos parâmetros de estruturas da vegetação, a partir dos dados de campo e de satélite referentes ao dia juliano 100. É apresentado também os resultados do estudo de sensibilidade do modelo contínuo para a temperatura de brilho, com polarização vertical (TBv), e para a razão de polarização (RP) sobre os parâmetros de estrutura da vegetação. O modelo discreto considera separadamente os elementos da vegetação (folhas, galhos e troncos). Como o cálculo dos coeficientes de extinção para os troncos e galhos, no modelo discreto, é complexo (seis classes de troncos e galhos), torna-se inviável a inversão desse modelo. No entanto, no apêndice A apresenta-se um estudo de sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical (TBv), e da razão de polarização aos parâmetros de estrutura da vegetação, simulado pelo modelo discreto.

4.1 - PARÂMETROS DE ESTRUTURA DA VEGETAÇÃO

Os parâmetros de estrutura da vegetação correspondem às variáveis cujos valores são mantidos constantes durante o período de estudo, as quais são descritas abaixo:

- Altura do dossel H (35 m);
- Fração volumétrica da vegetação f_v (m^3/m^3);
- Comprimentos de correlação vertical (L_z) e horizontal (L_ρ) da função de autocorrelação.

Foram utilizadas as temperaturas de brilho (TBv e TBh) obtidas no segundo período SMMR (dia juliano 100) às 12:00 horas local, para proceder à calibração dos parâmetros de estrutura f_v , L_z e L_ρ e da umidade da vegetação. Este período foi escolhido por não ter havido precipitação e cobertura de nuvens. Além disso, os dados de temperatura do solo e da cobertura vegetal disponíveis (Marques, 1991), foram calculados para esse período.

O procedimento descrito pela Equação 3.3 é utilizado para minimizar o erro quadrático médio entre a temperatura do dossel medida e a calculada pelo modelo. Primeiro, foi aplicado o método iterativo para a calibração da f_v para a frequência de 6.6GHz, obtendo-se o valor de 173 ppm. Esse valor foi então estendido a todas as frequências. Posteriormente, fez-se a calibração U_v , L_z e L_ρ para o mesmo período, cujos valores são descritos na Tabela 4.1.

TABELA 4.1 - PARÂMETROS DE ESTRUTURA E UMIDADE DA VEGETAÇÃO CALIBRADOS PARA O DIA JULIANO 100 ATRAVÉS DO MODELO CONTÍNUO

| FREQUÊNCIA (GHz) | UMIDADE | PARÂMETROS DE ESTRUTURA | |
|---------------------|---------------|-------------------------|------------|
| | U_v (kg/kg) | L_z (mm) | L_r (mm) |
| 37.0 | 0.44 | 0.9638 | 0.9995 |
| 18.0 | 0.56 | 1.5510 | 1.0347 |
| 10.7 | 0.63 | 3.6203 | 1.0170 |
| 6.6 | 0.63 | 9.2460 | 1.6678 |

Os valores de umidade da vegetação, resultantes da calibração do modelo, estão de acordo com os obtidos em experimentos de campo, na área de estudo, por Carvalho Júnior (1991) e McWilliam et al. (1992). Os altos valores do comprimento de correlação vertical L_z para as baixas frequências, mostrados na Tabela 4.1 são característicos de estruturas verticais (caules). Essas estruturas têm maior influência nas baixas frequências devido ao aumento da penetração da radiação de microondas, com a diminuição da frequência (Ulaby et al., 1982).

4.2 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO CONTÍNUO

Apresenta-se um estudo de sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical (TBv), e da razão de polarização (RP) aos parâmetros de fração volumétrica da vegetação (f_v), umidade da vegetação (U_v), gradiente de temperatura da vegetação (Γ) e temperatura da superfície (T_1). Neste estudo utilizou-se os valores dos parâmetros de estrutura da vegetação (f_v , L_z , L_ρ , e U_v), calibrados para o dia juliano 100 (Tabela 4.1).

4.2.1 - SENSIBILIDADE DA TEMPERATURA DE BRILHO, COM POLARIZAÇÃO VERTICAL, E DA RAZÃO DE POLARIZAÇÃO À FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DA VEGETAÇÃO

As variações da temperatura de brilho com polarização vertical e da razão de polarização como função da fração volumétrica da vegetação são apresentadas nas Figuras 4.1 e 4.3. A sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical, e da razão de polarização à fração volumétrica da vegetação são apresentadas nas Figuras 4.2 e 4.4.

O aumento da temperatura de brilho, com polarização vertical devido ao da biomassa (figura 4.1), é

resultante do aumento da contribuição da camada de vegetação. Além disso, a temperatura de brilho com polarização vertical apresentou-se mais sensível à fração volumétrica nas frequências de 6.6 GHz e 10.7 GHz (Figura 4.2). Esse efeito pode ser explicado pelo aumento da penetração da radiação de microondas no dossel vegetal com a diminuição da frequência (Kerr e Njoku, 1990; Ulaby et al., 1982; Wigneron et al., 1992).

Wigneron et al. (1992) e Kerr e Njoku (1990) simularam o efeito da fitomassa na razão de polarização e mostraram que ela é maior em solo exposto do que em superfície cobertas por vegetação. Esse efeito também pode ser observado na Figura 4.3, onde a razão de polarização diminui com o aumento da fração volumétrica, em todas as frequências. Provavelmente, o efeito da maior penetração da radiação de microondas no dossel para as baixas frequências é a causa da maior sensibilidade da razão de polarização à biomassa para as frequências de 6.6 e 10.7 GHz, para f_v acima de 80 ppm (Figura 4.4).

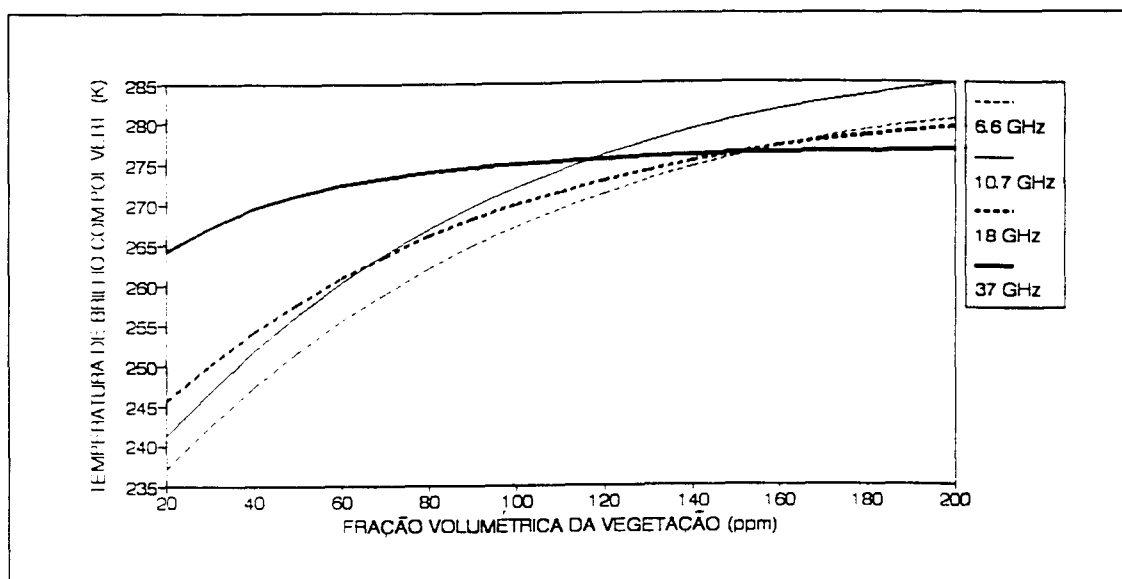


Fig.4.1 - Variação da temperatura de brilho, com polarização vertical, como função da fração volumétrica da vegetação, simulada pelo modelo contínuo.

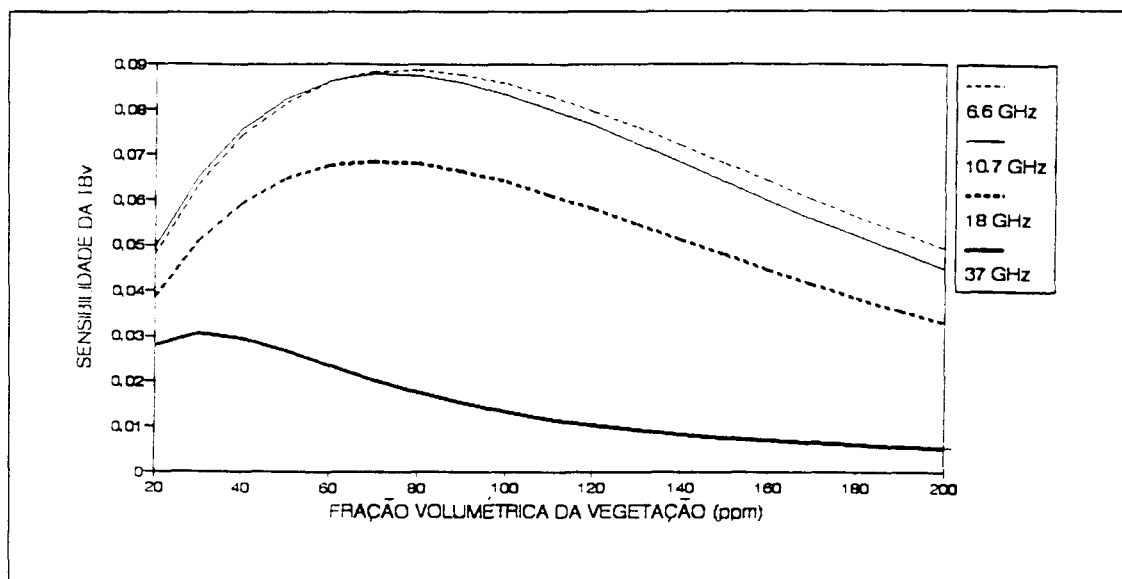


Fig. 4.2 - Sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical, à fração volumétrica da vegetação, simulada pelo modelo contínuo .

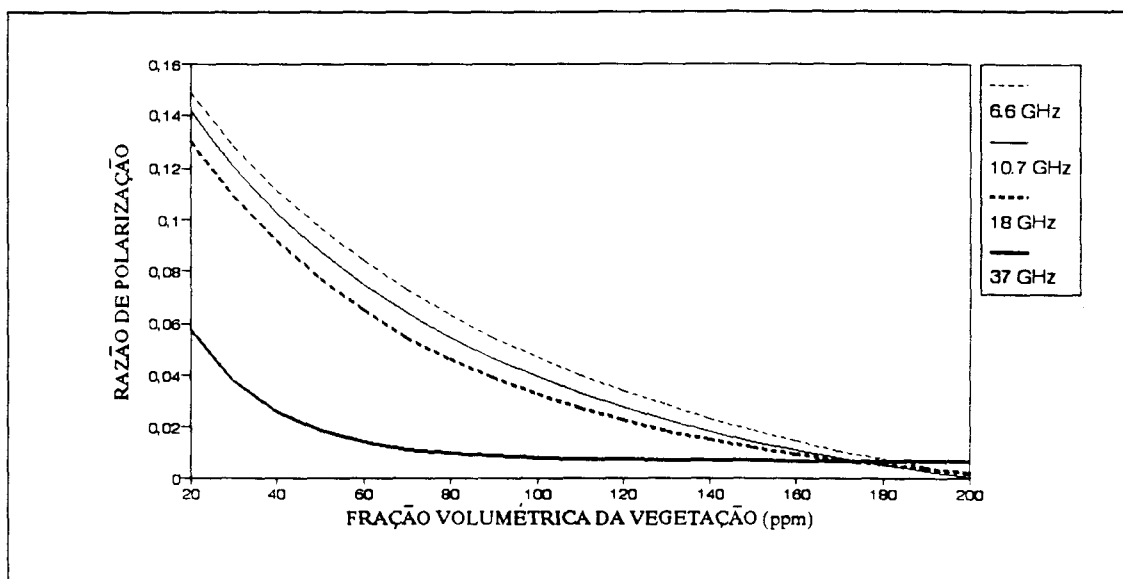


Fig. 4.3 - Variação da razão de polarização, como função da fração volumétrica da vegetação, simulada pelo modelo contínuo.

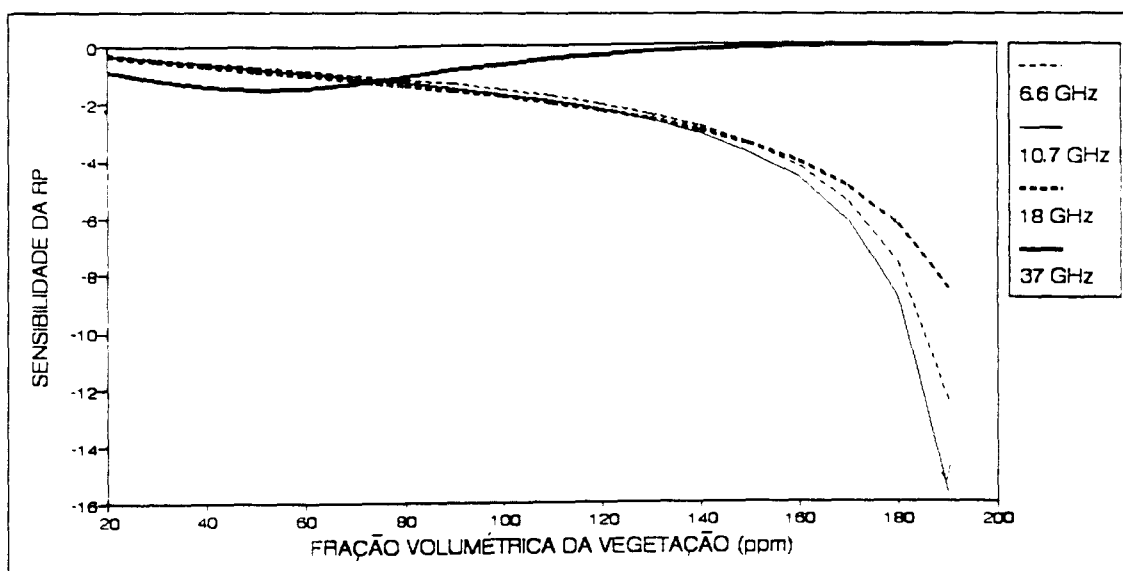


Fig. 4.4 - Sensibilidade da razão de polarização à fração volumétrica da vegetação, simulada pelo modelo contínuo.

4.2.2 - SENSIBILIDADE DA TEMPERATURA DE BRILHO, COM POLARIZAÇÃO VERTICAL, E DA RAZÃO DE POLARIZAÇÃO À UMIDADE DA VEGETAÇÃO

As variações da temperatura de brilho, com polarização vertical, e da razão de polarização como função da umidade da vegetação são apresentadas nas Figuras 4.5 e 4.7. A sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical, e da razão de polarização à umidade da vegetação são apresentadas nas Figuras 4.6 e 4.8.

Vários trabalhos têm demonstrado que a umidade da vegetação é o fator mais importante da emissão térmica na região de microondas (Wigneron et al. 1992; Wang et al. 1984; Pampaloni e Paloscia 1986).

Observa-se nas Figuras 4.5 e 4.6 que a temperatura de brilho, com polarização vertical, é mais sensível à umidade na frequência de 37 GHz. Possivelmente, a queda de T_{B_v} com o aumento da umidade é devido à diminuição da penetração com o aumento da umidade.

A Figura 4.8 mostra que as frequências de 6.6 e 37.0 GHz fornecem mais informações sobre a umidade da vegetação. Para as frequências de 10.7 GHz e 18.0 GHz, a sensibilidade da razão de polarização à umidade da vegetação é nula para valores de umidade de .47 e .65 respectivamente, o que dificulta a inversão do modelo quando os valores de U_v estão próximos dos valores citados.

A sensibilidade da razão de polarização à umidade da vegetação é positiva para a frequência de 37.0 GHz e negativa para 6.6 GHz, quando a umidade da vegetação é menor que 0.85 (Figura 4.8). Conseqüentemente, para aumentar a sensibilidade da razão de polarização à umidade, poderá ser definido um índice que utilize

informações dessas duas frequências, como por exemplo a razão simples ($U_{v37} - U_{v6.6}$) ou a diferença normalizada ($(U_{v37} - U_{v6.6}) / (U_{v37} + U_{v6.6})$) entre as duas frequências. Estes índices representam fisicamente um gradiente vertical de umidade na vegetação, onde a 37.00 GHz têm a umidade do topo da vegetação, e a 6.6 GHz a umidade de todas as camadas da vegetação.

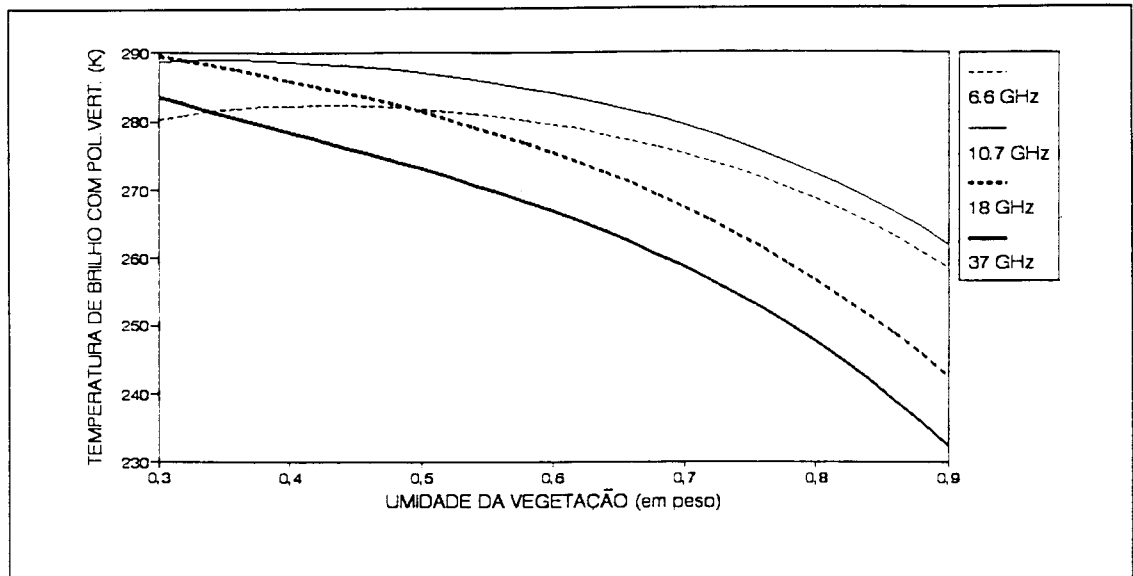


Fig. 4.5 - Variação da temperatura de brilho com polarização vertical, como função da umidade da vegetação, simulada pelo modelo contínuo.

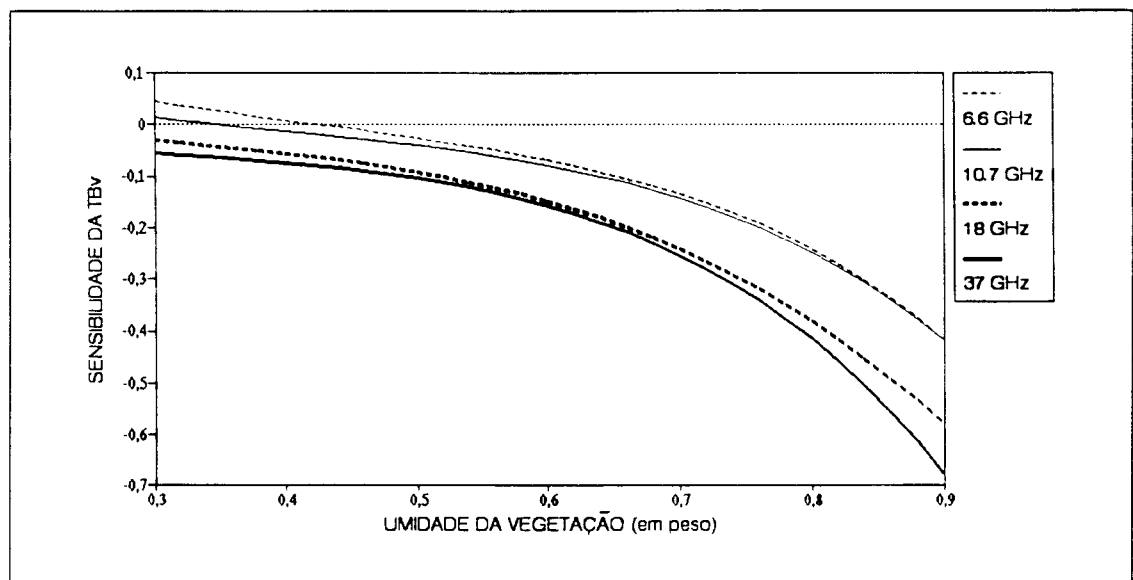


Fig. 4.6 - Sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical, à umidade da vegetação, simulada pelo modelo contínuo.

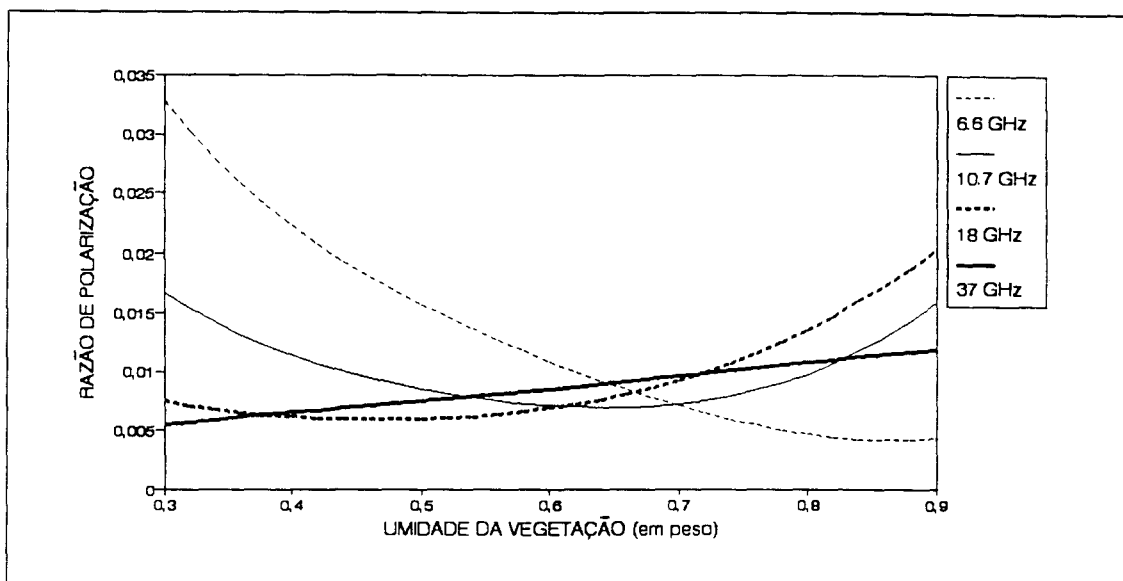


Fig. 4.7 - Variação da razão de polarização, como função da umidade da vegetação, simulada pelo modelo contínuo.

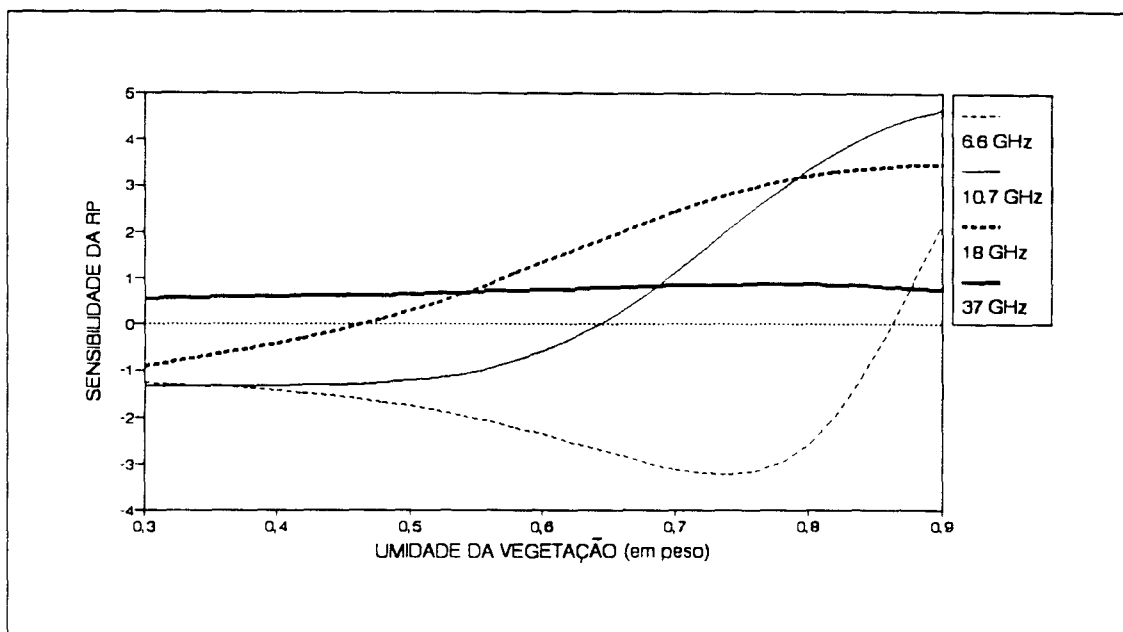


Fig. 4.8 - Sensibilidade da razão de polarização à umidade da vegetação, simulada pelo modelo contínuo.

4.2.3 - SENSIBILIDADE DA TEMPERATURA DE BRILHO, COM POLARIZAÇÃO VERTICAL, E DA RAZÃO DE POLARIZAÇÃO AO GRADIENTE DE TEMPERATURA DA VEGETAÇÃO

O gradiente vertical de temperatura da vegetação Γ é expresso por:

$$\Gamma = (T_2 - T_1)/H \quad (\text{K.m}^{-1}), \quad (4.1)$$

sendo:

T_2 = temperatura do topo da vegetação (K);

T_1 = Temperatura da superfície do solo (K);

H = altura média do dossel da vegetação (m).

As variações da temperatura de brilho, com polarização vertical, e da razão de polarização, como função do gradiente de temperatura da vegetação, são apresentadas nas Figuras 4.9 e 4.11. A sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical, e da razão de polarização ao gradiente de temperatura da vegetação são apresentadas nas Figuras 4.10 e 4.12.

Conforme pode ser observado através dos resultados apresentados nas Figuras 4.9 e 4.10, a sensibilidade de T_{bv} ao gradiente de temperatura foi muito baixa (< 0.018). No entanto, a razão de polarização se mostrou bastante sensível ao gradiente de temperatura, para as baixas frequências (Figura 4.12). A possível explicação deve-se ao fato de nas baixas frequências existir contribuição das camadas mais baixas da vegetação.

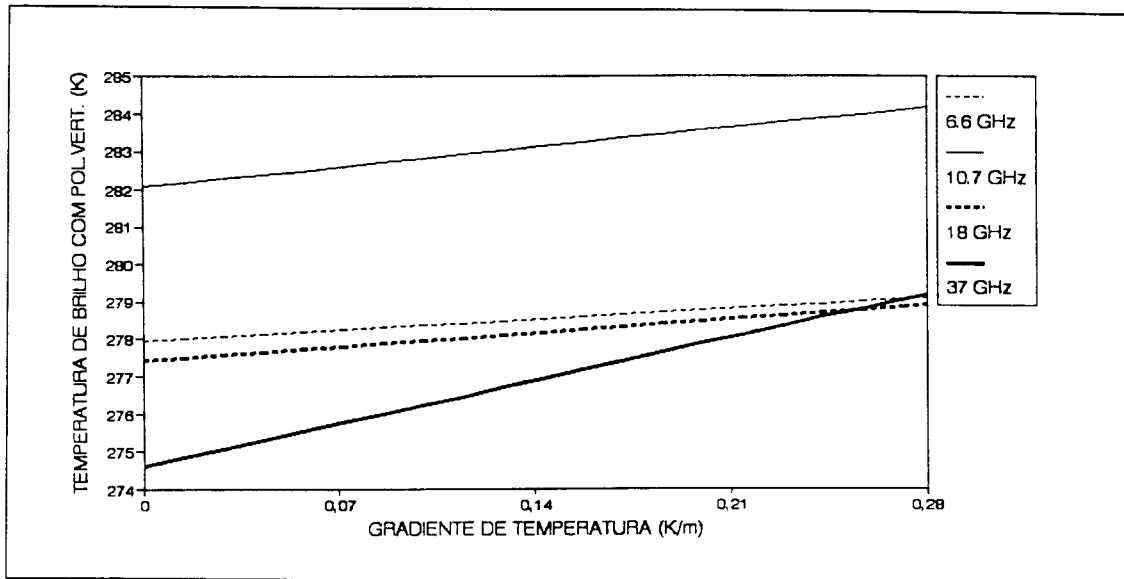


Fig. 4.9 - Variação da temperatura de brilho com polarização vertical, como função do gradiente de temperatura, simulada pelo modelo contínuo.

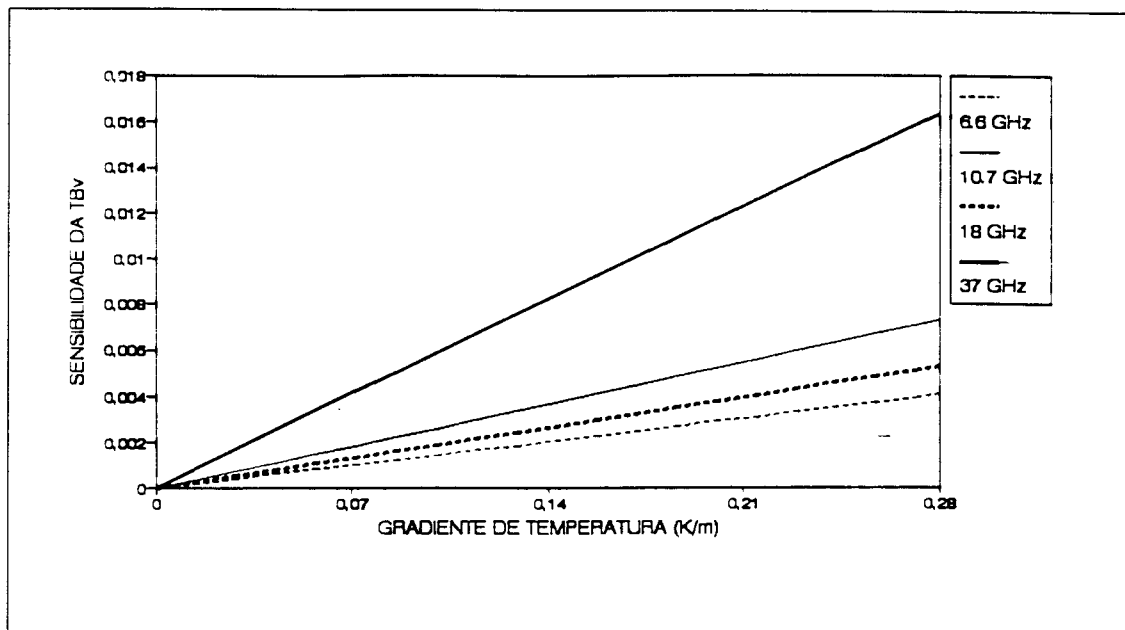


Fig. 4.10 - Sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical, ao gradiente de temperatura, simulada pelo modelo contínuo.

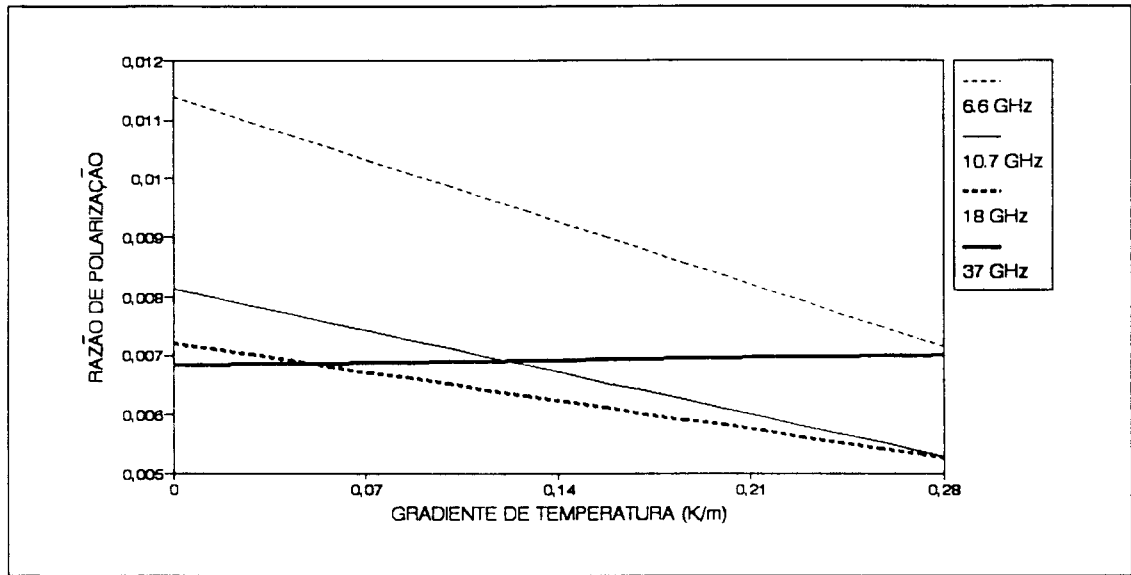


Fig. 4.11 - Variação da razão de polarização , como função do gradiente de temperatura da vegetação, simulada pelo modelo contínuo.

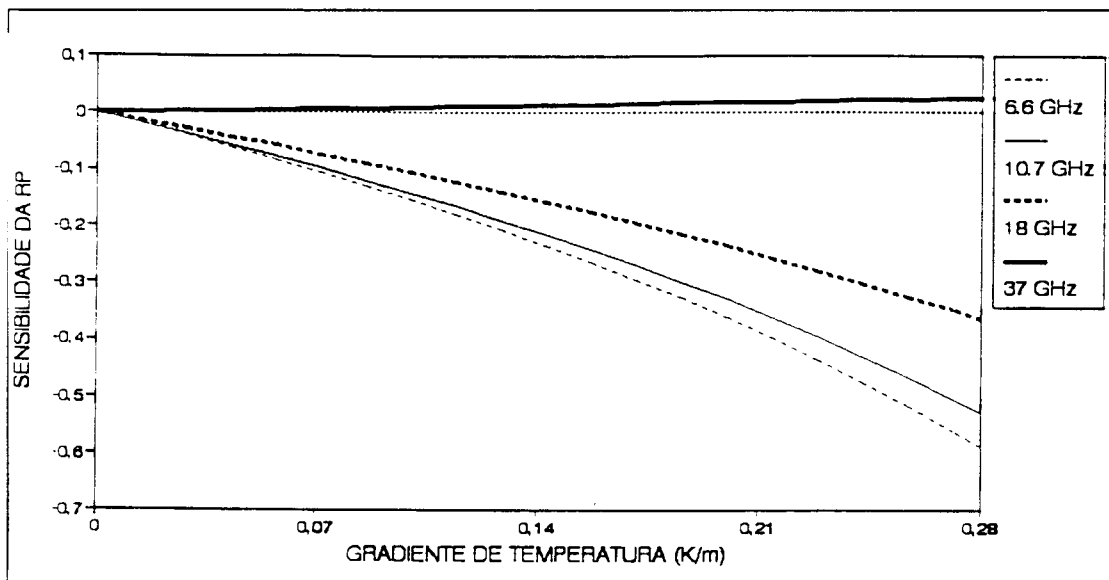


Fig. 4.12 - Sensibilidade da razão de polarização ao gradiente de temperatura da vegetação, simulada pelo modelo contínuo.

4.2.4 - SENSIBILIDADE DA TEMPERATURA DE BRILHO, COM POLARIZAÇÃO VERTICAL, E DA RAZÃO DE POLARIZAÇÃO À TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE

As Figuras 4.13 a 4.15 mostram a variação da temperatura de brilho, com polarização vertical, e da razão de polarização como função da temperatura da superfície. A sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical, e da razão de polarização à temperatura da superfície são apresentadas nas Figuras 4.14 e 4.16.

Conforme pode ser observado, tanto a temperatura de brilho, com polarização vertical, quanto a razão de polarização tem alta sensibilidade à temperatura da superfície. No entanto, na frequência de 37.0 GHz, a razão de polarização apresenta-se pouco sensível à temperatura da superfície. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que nessa frequência a emissão é resultante apenas da contribuição do topo da vegetação.

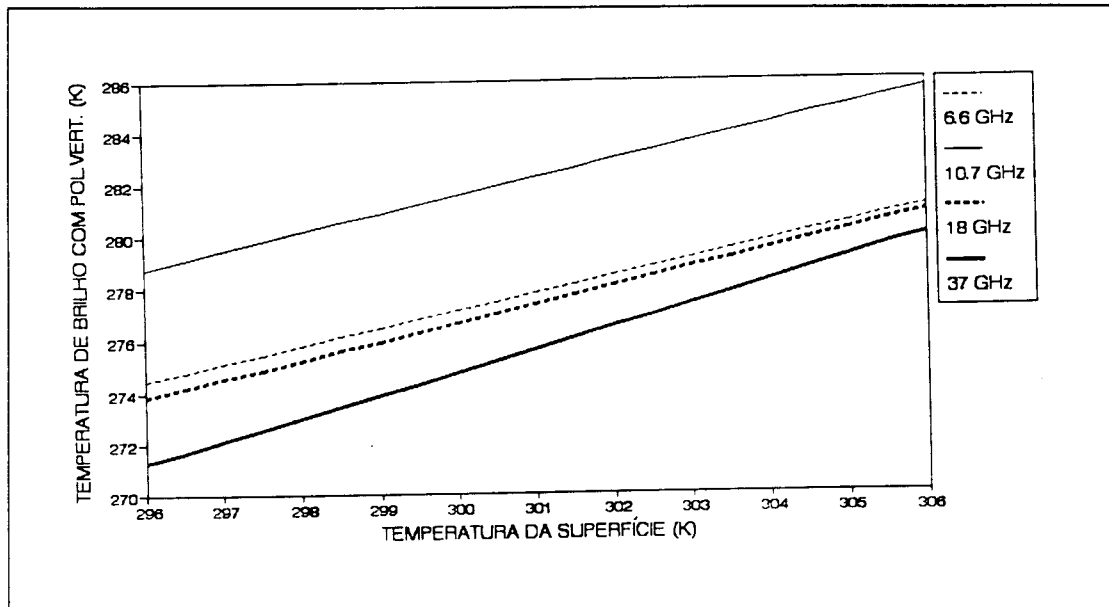


Fig.4.13 - Variação da temperatura de brilho, com polarização vertical, como função da temperatura da superfície, simulada pelo modelo contínuo.

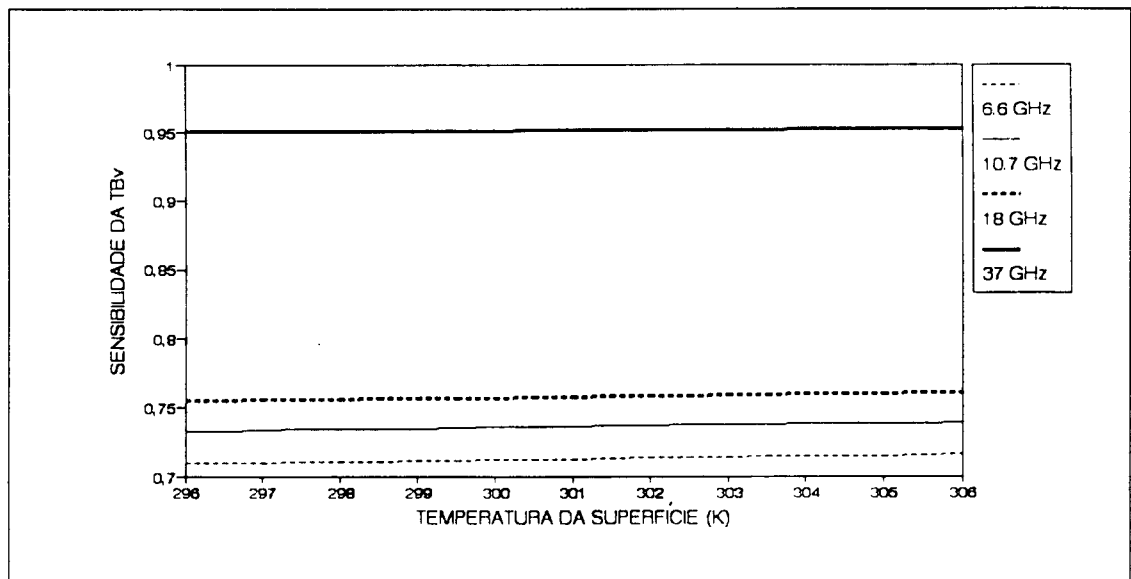


Fig. 4.14 - Sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical, à temperatura da superfície, simulada pelo modelo contínuo.

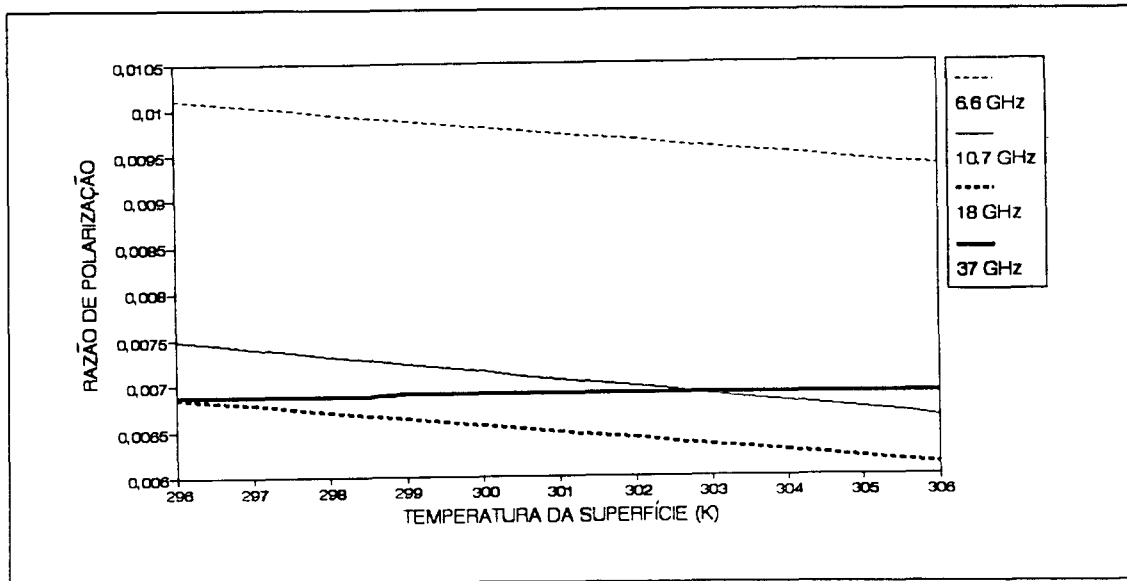


Fig. 4.15 - Variação da razão de polarização, como função da temperatura da superfície, simulada pelo modelo contínuo.

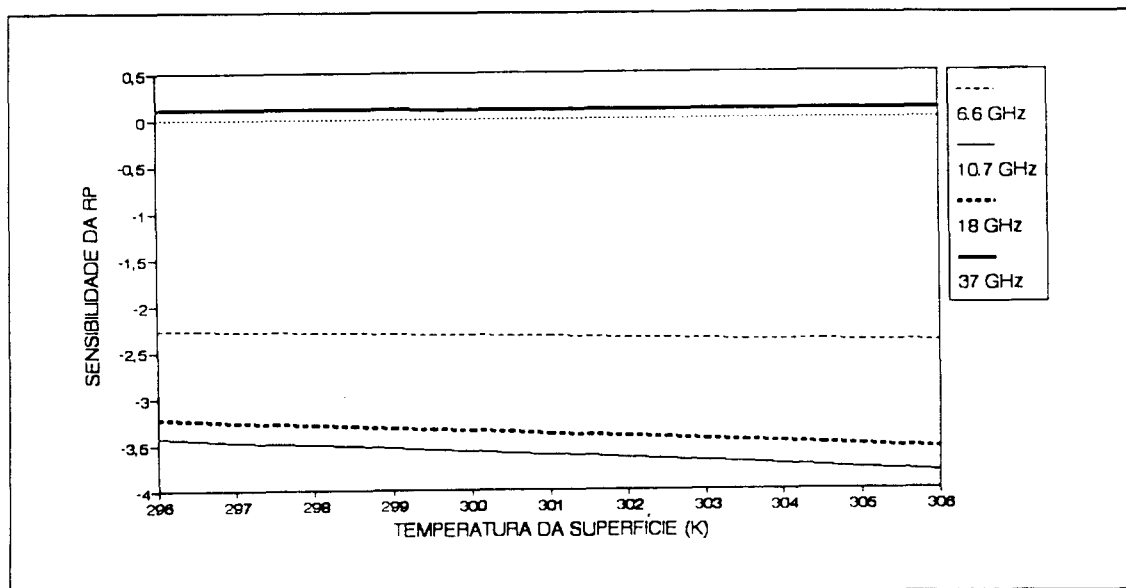


Fig. 4.16 - Sensibilidade da razão de polarização à temperatura da superfície, simulada pelo modelo contínuo.

4.3 - VALORES DE TEMPERATURA E UMIDADE DA VEGETAÇÃO OBTIDOS ATRAVÉS DA INVERSÃO DO MODELO CONTÍNUO

O procedimento de otimização de função, descrito no Capítulo 3, foi utilizado para inversão do modelo contínuo.

Após ter calibrado os parâmetros de estrutura da vegetação (f_v , L_z e $L\rho$), para o dia juliano 100, esses parâmetros foram considerados constantes durante todo período de estudo.

Posteriormente, procedeu-se à inversão do modelo contínuo para obtenção da temperatura da vegetação (T_v) em dois níveis (1.45m e 30.51m) e da umidade da vegetação, para todos os períodos das estações úmida (abril/maio) e seca (julho/agosto) de 1985, às 12:00 e 24:00 horas local.

4.3.1 - TEMPERATURA DA VEGETAÇÃO

Nas Figuras de 17 a 20 são apresentadas as da temperatura da vegetação T_v , obtidas através da inversão do modelo contínuo para as estações úmida (abril/maio) e seca (julho/agosto), às 12:00 e 24:00 horas local, respectivamente. Nessas Figuras estão plotados também os valores de temperatura do ar (T_a), em dois níveis (1.45 e 30.51 m), e de precipitação medidos na Reserva Florestal Ducke durante os experimentos ARME e ABLE-2A.

Para todos os períodos SMMR utilizados, a temperatura da vegetação, calculada pelo modelo, teve um comportamento coerente com a temperatura do ar medida no campo (Figuras de 4.17 a 4.20).

Como esperado, a temperatura da vegetação, às 12:00 horas local é dois a quatro graus superior à temperatura do ar no topo da vegetação (Figuras 4.17 e 4.19). Por outro lado, a temperatura da vegetação próxima à superfície do solo, às 24:00 horas, é menor que a temperatura do ar, como pode ser visto nas Figuras 4.18 e 4.20.

Nas Figuras 4.17 e 4.18 observa-se uma correspondência entre períodos do SMMR com chuvas intensas e a redução do gradiente de temperatura da vegetação. Provavelmente, a causa desse efeito é a redução da resistência estomática nos períodos de chuvas intensas.

Espera-se que a temperatura do ar às 24:00 horas local seja maior que a temperatura da vegetação. Este comportamento pode ser observado na Figura 4.20, onde estão representados os resultados referentes à estação seca naquele horário. No entanto, para a estação úmida (Figura 4.18), a temperatura da vegetação às 24:00 horas local chega a ser de um a dois graus maior que a temperatura do ar. A hipótese que poderia explicar esse comportamento particular, é ligada ao aumento da formação de orvalho e neblina durante a noite no período úmido. Esses fenômenos não são contabilizados pelo modelo contínuo durante o cálculo da emissão da vegetação e da correção atmosférica dos dados SMMR.

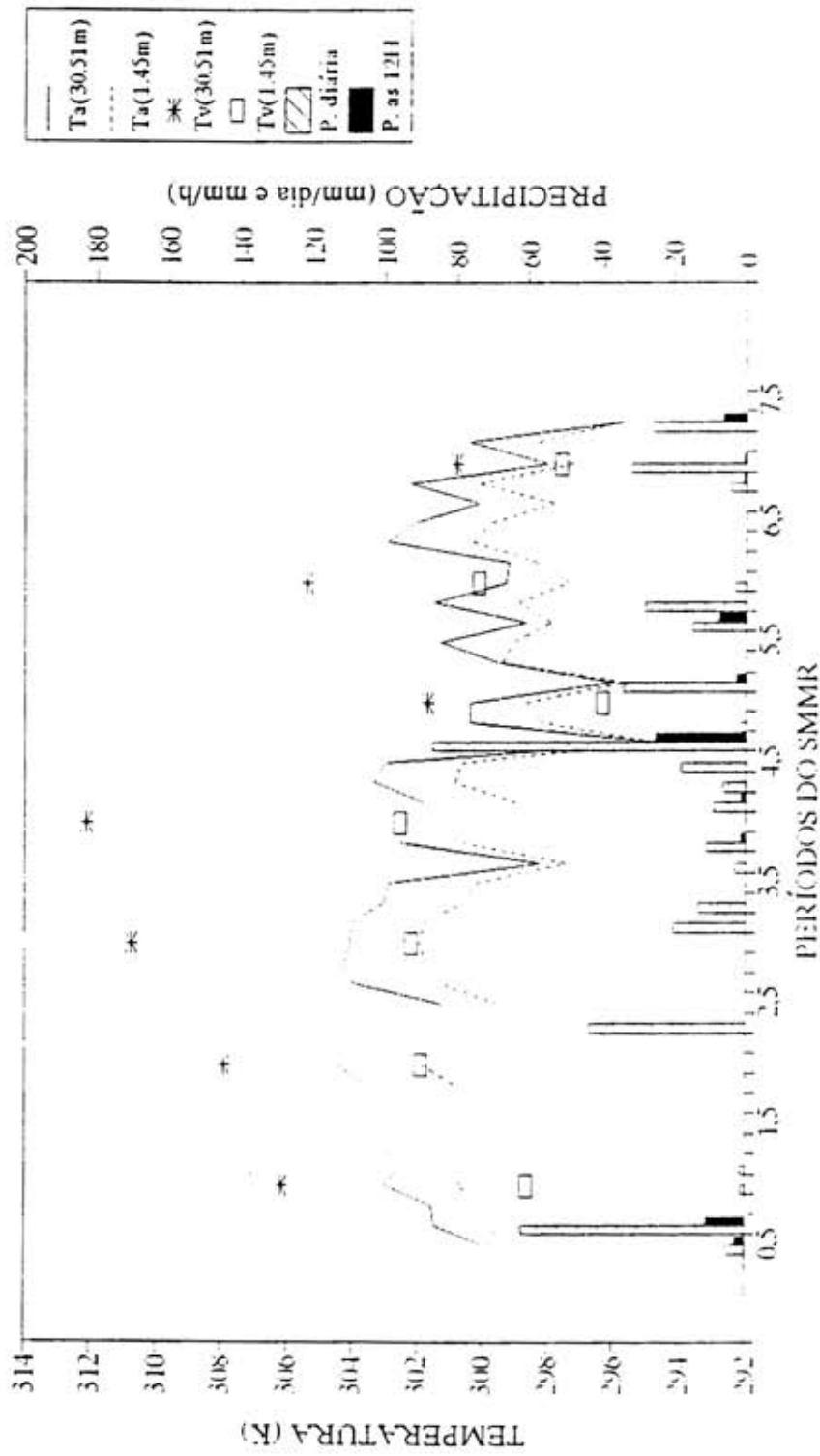


Fig. 4.17 - Temperaturas da vegetação (Tv) às 12:00 horas local obtidas pela inversão do modelo contínuo, temperaturas do ar (Ta) e precipitação medida na Reserva Florestal Ducke, para a estação úmida (abril/maio) de 1985.

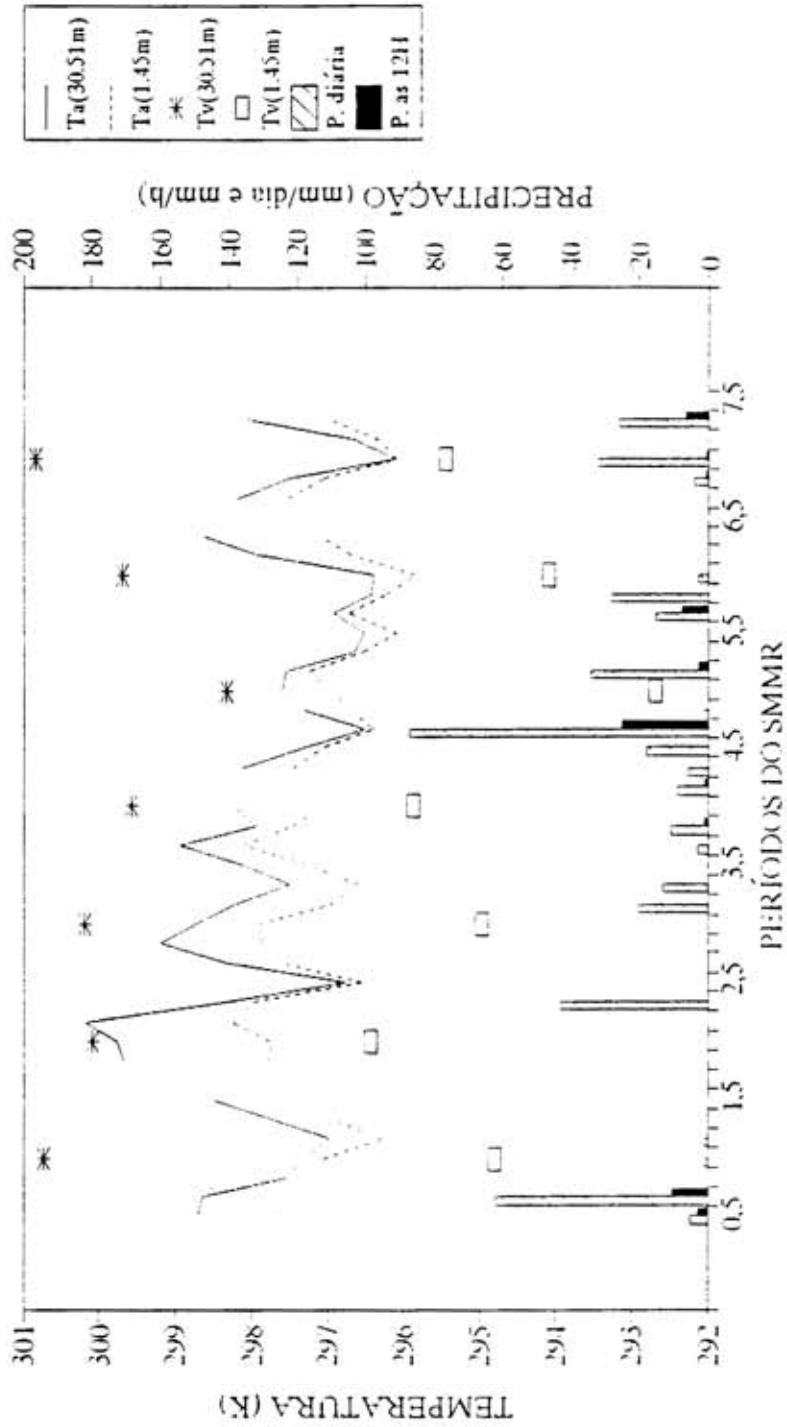


Fig. 4.18 - Temperaturas da vegetação (Tv) às 24:00 horas local obtidas pela inversão do modelo contínuo, temperaturas do ar (Ta) e precipitação medida na Reserva Florestal Ducke, para a estação úmida (abril/maio) de 1985.

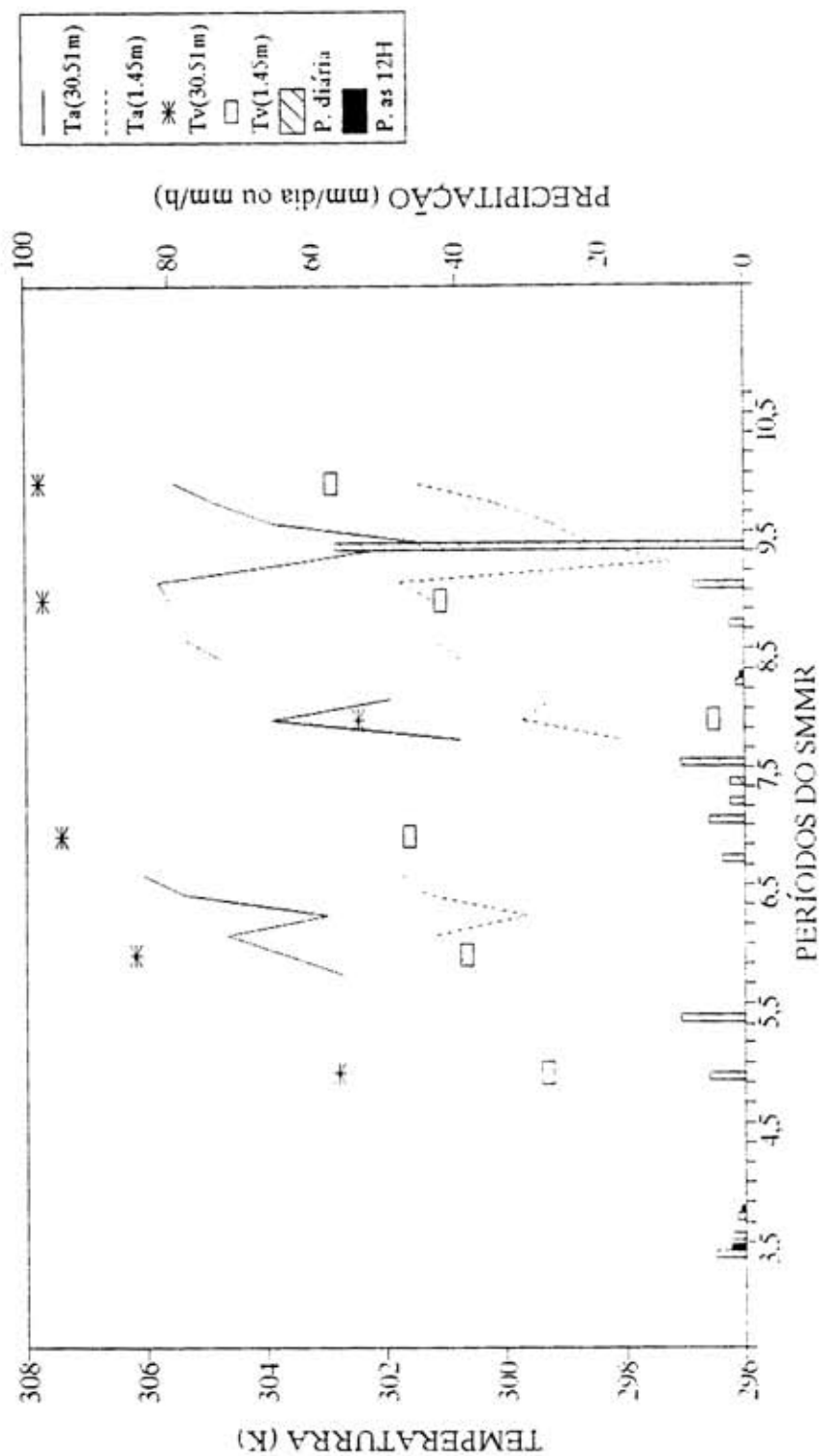


Fig. 4.19 - Temperaturas da vegetação (Tv) às 12:00 horas local obtidas pela inversão do modelo contínuo, temperaturas do ar (Ta) e precipitação medida na Reserva Florestal Ducke, para a estação seca (julho/agosto) de 1985.

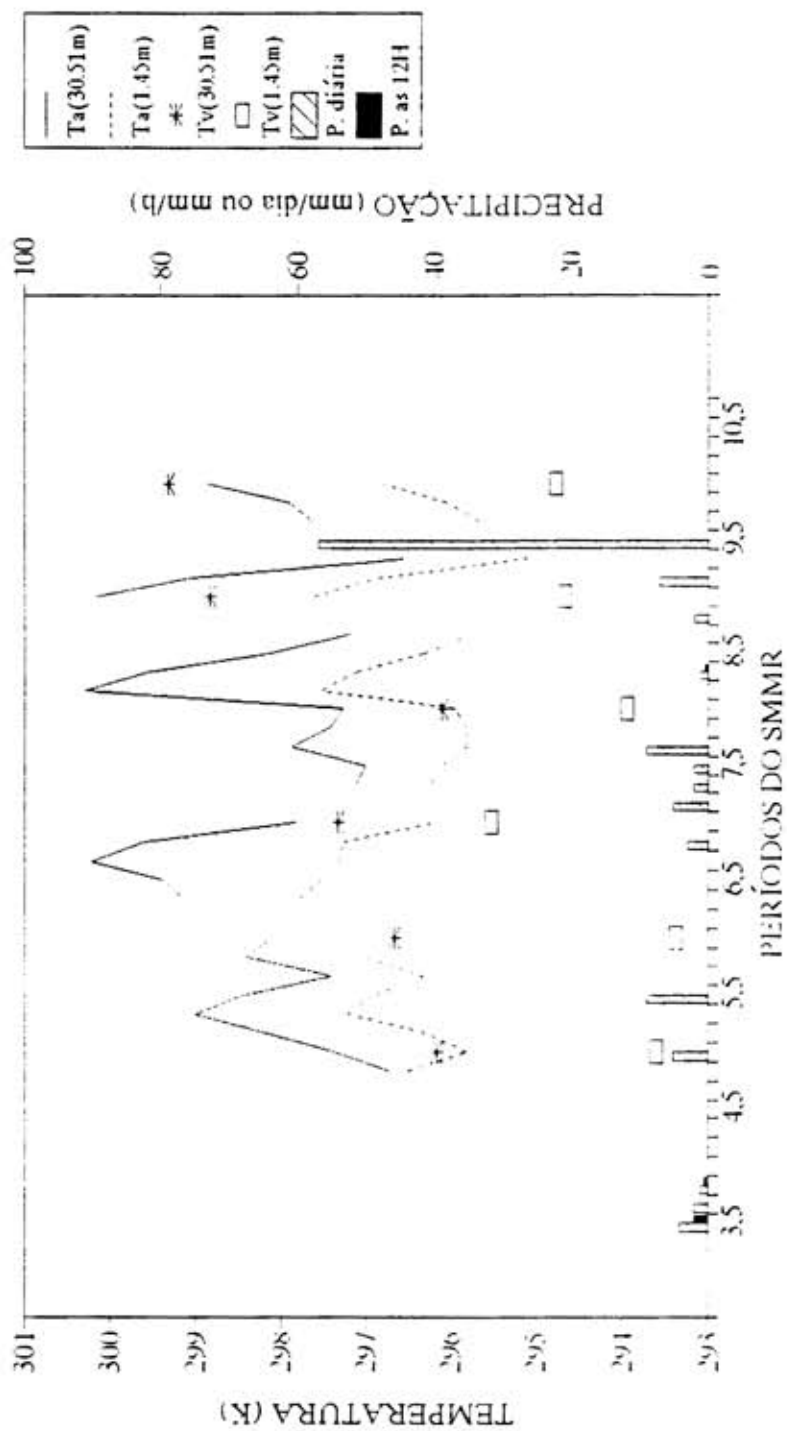


Fig. 4.20 - Temperaturas da vegetação (Tv) às 24:00 horas local obtidas pela inversão do modelo contínuo, temperaturas do ar (Ta) e precipitação medida na Reserva Florestal Ducke, para a estação seca (julho/agosto) de 1985.

4.3.2 - UMIDADE DA VEGETAÇÃO

A partir dos resultados de sensibilidade da razão de polarização à umidade da vegetação (Figura 4.7), foi definida um índice, denominado razão de umidade, que considera a umidade da vegetação obtida pelo modelo para as frequências de 37.0 GHz e 6.6 GHz e expresso por:

$$RU = (U_{v37.0} - U_{v6.6}) / (U_{v37.0} + U_{v6.6}) \quad (4.2)$$

Medidas de resistência estomática foram obtidas por Roberts et al. (1990), durante o ano de 1985 para *Pitadenia sauveolens*, que é uma espécie de porte alto (39.3 m), encontrada no sítio da Reserva Florerstal Duce.

Os valores de razão de umidade (RU), obtidos a partir do modelo contínuo para as estações úmida e seca de 1985, foram relacionados com dados de resistência estomática (RE), obtidas por Roberts et al. (1990), os quais são mostrados na Figura 4.21. Esta relação foi obtida apenas para a espécie *Pitadenia sauveolens*, pois não havia valores de resistência estomática obtidos para outras espécies durante o período de estudo.

Apesar da existência de poucos pontos, uma relação exponencial foi encontrada para as duas estações. O teste F mostrou que existe uma dependência entre os valores de resistência estomática RE e razão de umidade RU a nível de 5% de significância. As equações 4.2 e 4.3 expressam a relação exponencial obtida para as estações seca e úmida respectivamente:

$$RU = - 0.0007 - 0.0223.exp(RE/100), \quad (r^2 = 0.45) \quad (4.2)$$

$$RU = 0.387 - 0.223 \cdot \exp(RE/100), \quad (r^2 = 0.84) \quad (4.3)$$

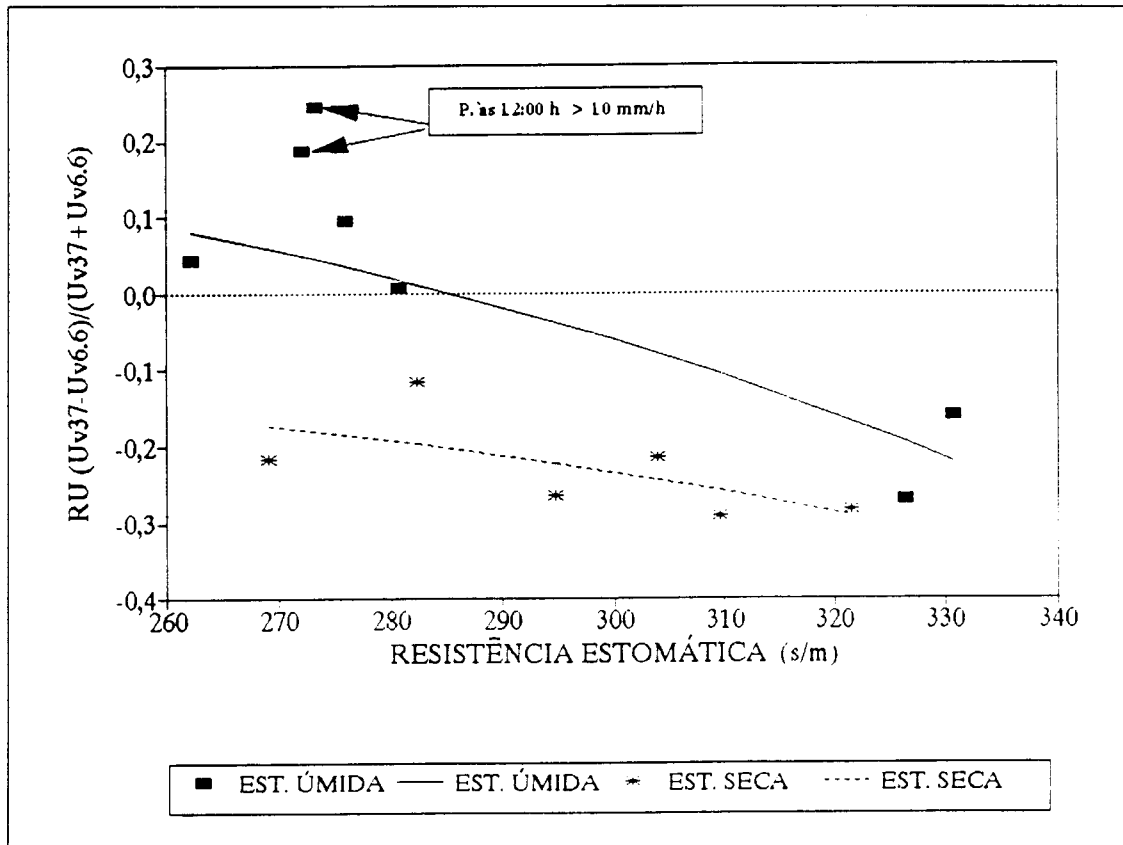


Fig. 4.21 - Relação entre a razão de umidade obtida através da inversão do modelo contínuo e a resistência estomática de *Pitadenia sauaveolens*, na Reserva Florestal Ducke, durante as estações úmida (abril/maio) e seca (julho/agosto) de 1985.

A diferença constante na regressão linear das estações úmida e seca pode ser explicada pela variação sazonal do conteúdo de água dos troncos e galhos.

Os períodos com altos valores da razão de umidade, coincidentes com chuvas intensas (taxa de precipitação às 12:00 horas local superior a 10 mm/h) não foram usados no cálculo da regressão.

Conforme mostra a Figura 4.22, a influência da precipitação na umidade, obtida pela inversão do modelo, é maior na frequência de 37.0 GHz. Isto possivelmente ocorre porque nesta frequência a contribuição do sinal é apenas do topo da vegetação, onde as folhas podem se apresentar cobertas por água líquida após chuvas intensas.

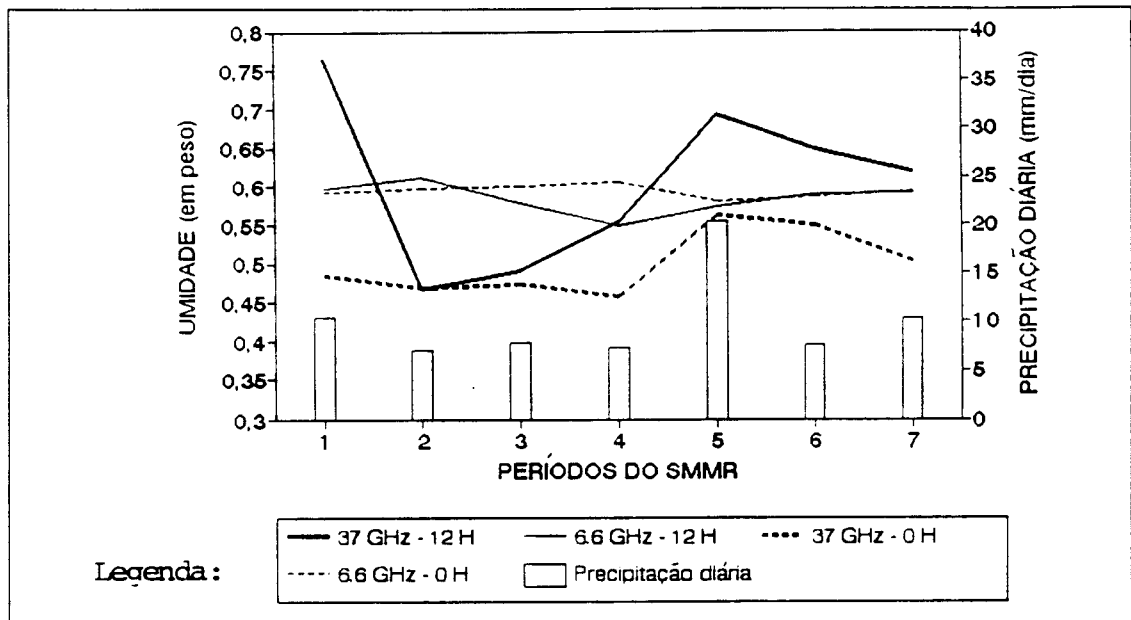


Fig 4.22 - Valores de umidade da vegetação obtidos a partir do modelo contínuo, para a estação úmida, às 12:00 e 24:00 horas local, nas frequências de 6.6 e 37.0 GHz.

CAPÍTULO 5CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho mostra que é possível estimar a temperatura e a umidade do dossel da floresta de terra firme, a partir da utilização de um modelo contínuo de emissão de microondas e de dados orbitais de temperatura de brilho obtidos pelo sensor SMMR/Nimbus-7. Analisando os resultados deste trabalho, foi possível chegar às seguintes conclusões e recomendações:

- 1) A análise de sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical, e da razão de polarização permitiu avaliar a influência dos parâmetros de entrada na variável de resposta dos modelos contínuo e discreto. A temperatura de brilho com polarização vertical e a razão de polarização simuladas pelos modelos contínuo e discreto, são sensíveis aos parâmetros de biomassa, umidade da vegetação, temperatura da vegetação e gradiente de temperatura da vegetação.
- 2) O modelo contínuo mostrou-se mais eficiente do que o modelo discreto para o estudo da cobertura vegetal, pois, além de requerer poucos parâmetros de entrada referentes à cobertura vegetal, seu tempo de processamento é muito menor. O grande número de parâmetros de entrada, juntamente com o alto tempo requerido para processamento, inviabilizou a inversão do modelo discreto.
- 3) Os valores de umidade do dossel da floresta de terra firme, obtidos através da inversão do modelo contínuo, estão próximos aos valores de umidade da vegetação encontrados em experimentos de campo na

Reserva Florestal Ducke. Além disso, a temperatura da vegetação, calculada através da inversão do modelo contínuo, teve um comportamento coerente com a temperatura do ar medida durante os experimentos ABLE/2A E ARME, no mesmo período de estudo.

- 4) O índice razão de umidade (diferença normalizada da umidade a 37.0 e 6.6 GHz) apresentou-se como um bom indicador da resistência estomática da vegetação. Para as duas estações (úmida e seca) de 1985, o índice razão de umidade, calculado a partir da inversão do modelo contínuo, apresentou boa correlação com a resistência estomática da espécie *Piptadenia suaveolens* na Reserva Florestal Ducke.
- 5) O aperfeiçoamento da modelagem de emissão de microondas por superfícies vegetadas deverá ser conduzido futuramente, através de experimentos de campo em áreas cobertas por vegetação (culturas e/ou florestas), de modo a fornecer uma base de dados sobre a estrutura e a umidade dos elementos do dossel da vegetação. Esta base de dados será útil tanto para a calibração e aperfeiçoamento de modelos existentes, quanto para a implementação de novos modelos.
- 6) Os valores de temperatura e umidade da floresta de terra firme deverão ser utilizados em futuros estudos de estimativas de evapotranspiração, que poderão ser realizados a partir de modelos lagrangeanos da evapotranspiração, os quais têm como dados de entrada o perfil vertical de temperatura do dossel e a resistência estomática das folhas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- Cabral, M.R.C. Armazenagem da água num solo com floresta de terra firme e com seringal implantado. (Dissertação de Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1991. 104 p. (INPE- 5282-TDI/452)
- Calvet, J.C; Kerr, Y. Utilization des micro-ondes passives sur la foret Amazonienne. Toulouse, MÉTEO-France, CNES/LERTS. 1991. 31p.
- Carvalho Júnior, J.A. Balanço de carbono em queimada na estação experimental de silvicultura tropical: INPA-Manaus: relatório preliminar. São José dos Campos, INPE, nov. 1991.
- Chandrasekhar, S. Radiative transfer. New York, NY, Dover Publication , 1960. 319 p.
- Choe, Y.; Tsang, L. A mathematical characterization of vegetation effect on microwave Remote sensing from the earth. Remote Sensing Center, Texas, A/M University. Aug. 1983. (NASA CR-173051)
- Choudhury, B.J.; Wang, J.R.; HSU, A.Y. Simulated and observed 37 GHz emission over Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 11(10):1837-1868, Oct. 1990.
- Chuang, S.L.; Kong, J.A.; Tsang, L. Radiative transfer theory for passive microwave remote sensing of a two layer random medium with cylindrical structures. *Journal of Applied Physics*, 51(11):5588-5593, Nov. 1980.

- Comiso, J.C.; Zwally, H.L. **Polar microwave Brightness temperatures from Nimbus-7 SMMR.** Washington, DC. July 1989. 112 p. (NASA RP-1223).
- Eom, H.L.; Fung, H.S. Application of first order renormalization method to scattering from vegetation up to Ku-band. **Remote Sensing of Environment**, 15(1):185-200, Nov. 1984.
- Folster, H.; De Las Salas, G.; Khanna, P. A tropical evergreen forest site with perched water table, Madalena Valley, Colombia: Biomass and biolement inventory of primary and secondary vegetation. **Ecologia Plantarum**, 11(4):297-320, Apr. 1976.
- Forti, M.C. **Hidroquímica das soluções na interface atmosfera-solo num ecossistema de floresta de terra firme (Amazônia central).** (Tese de Doutorado em Geofísica). Departamento de Geofísica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989. 151 p.
- Fraser, K.S.; Gaut, N.E.; Reinfenstem II, E.C.; Seevering, H. Interaction mechanisms within the atmosphere. In: Reeves, P.G.; Anson, A.; Landeu, D. ASP, 1975. v.1, cap.5, p. 207-210.
- Goel, S.N.; Strebel, D.E. Simple Beta distribution representation of leaf orientation in vegetation canopies. **Agronomy Journal**, 76(5):800-803, May 1984.
- Hofer, R.; Njoku, E.G. Regression techniques for oceanographic parameter retrieval using space borne microwave radiometer. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, GE-19(1):178-189, 1981, Apr. 1981.

- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).
Mapa de vegetação da Amazônia Legal: Escala 1/250.000.
In: ——— Projeto de zoneamento das potencialidades
dos recursos da Amazônia Legal. Rio de Janeiro, IBGE,
1990.
- Isaacs, R.G.; Jyn, Y.; Worsham, R.D.; Deblonde, G.;
Falcone, J.V. The RADTRAN microwave Surface Emission
models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote
Sensing*, GE-27(4):433-440, Apr. 1989.
- Ishimaru, A. *Wave propagation and Scattering in random
Media: Single and transport theory*. New York, NY,
Academic, 1978, 250 p. v.1.
- Jordan, C.F.; UHL, C. Biomass of "tierra firme" forest in
the Amazon Basin. *Ecologia Plantarum*, 13(4):387-400,
Apr. 1978.
- Joseph, J.H.; Wiscombre, W. The Delta-Eddington
approximation for radiative flux transfer. *Journal of
the Atmospheric Sciences*, 23(11):2452-2459, Nov. 1976.
- Karam, M.A.; Fung, A.K. Electromagnetic scattering from
a layer of finite length, randomly oriented, dielectric,
circular cylinders over a rough interface with
application to vegetation. *International Journal of
Remote Sensing*, 9(6):1109-1134, June 1988.
- Karam, M.A.; Fung, A.K.; Antar, Y.M.M. Electromagnetic
wave scattering from some vegetation samples. *IEEE
Transactions on Geoscience and Remote Sensing*,
GE-26(6):799-807, Nov. 1988.

- Kerr, Y.H.; Njoku, E.G. A semiempirical model for interpreting microwave emission from semiarid land surfaces as seen from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-28(3):384-396, July 1990.
- Kousky, V.E.; Kagano, M.T. A climatological study of the tropospheric circulation over the Amazon region. *Acta Amazonica*, 11(4):743-758, Apr. 1981.
- Marques, A.O.F. Temperatura das folhas da vegetação da Reserva Florestal Ducke calculadas a partir de um modelo para o dia juliano 100 de 1985. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, 1991. Comunicação pessoal.
- McCuen, R.H. The role of sensitivity analysis in hydrologic modelling. *Journal of Hydrology*, 18(1):37-53, Jan. 1973.
- McWilliam, A.L.C.; Roberts, J.M.; Cabral, O.M.R.; Leitão, M.V.B.R.; Costa, A.C.L.; Maitelli, G.T.; Zamparoni, C.A.G.P.; Leaf area index and above-ground biomass of terra firme rainforest and adjacent clearing in Amazonia. Aceito para publicação no *Journal of Functional Ecology*, 1992.
- Mo, T. et al. A model for microwave emission from vegetation. *Journal of Geophysical Research*, C87(13):11229-11237, Dec. 1982.
- Mougin, E.; Lopes, A. Modele discret de l'emission des couverts vegetaux. CERS, 1990. Comunicação pessoal.

- Mougin, E.; Lopes, A.; Toan, T. Microwave propagation at X band in cylindrical shaped forest componentes: Attenuation observation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, GE-28 (1):60-69, Jan. 1990.
- Novo, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo, Edgard Blücher, 1988. 308 p.
- Pampaloni, P.; Paloscia, S. Microwave emission and plant water content: A comparison between field measurements and theory. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, GE-24 (1):900-905, June 1986.
- Press, H.W.; Flannery, B.P.; Teukolsky, S.A.; Vetterling, W.T. **Numerical Recipes: The art of scientific computing**. Ney York, NY, Cambridge University. 1990
- Projeto RADAMBRASIL. **Folha Santarém- Escala:1/1.500.000: mapa de subsídios ao planejamento regional**. Rio de Janeiro, 1976 (Levantamento de Recursos Naturais, 10).
- Roberts, J.; Cabral, O.M.R. Aguiar, L.F. Stomatal and boundary-layer conductances in an Amazonian terra firme forest. **Journal of Applied Ecological**. 27(1):336-353, Apr. 1990.
- Sá L.D.A.; Viswanadham, Y.; Manzi, A.O. Energy flux partitioning over the Amazon forest. **Theoretical Applied Climatology**, 39(1): 1-16, Jan. 1988.
- Sellers, P.J.; Shuttleworth, W.J.; Dorman, J.L. Calibration of the simple biosphere model for Amazonian tropical forest using field and remote sensing data. Part I: average calibration with field data. **Journal of Applied Meteorology**, 28(8):727-759, Aug. 1989.

- Shuttleworth, H.J. et al. Eddy correlation measurements of energy partition for Amazonian forest. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 110(466): 1143-1162, Oct. 1984.
- Tsang, L.; Kong, J.A. The brightness temperature of a half-space medium with nonuniform temperature profile. *Radio Science*, 10(12):1025-1033, Dec. 1975.
- Tsang, L.; Kong, J.A. Thermal microwave emission from half-space random media. *Radio Science*, 11(7):1223-1253, July 1976.
- Tsang, L. Kong, J.A. Thermal microwave emission from three-layer random medium with three-dimensional variations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-18(2):212-216, Apr. 1980
- Tsang, L.; Kong, J.A. Scattering of electromagnetic waves from random with strong permittivity fluctuations. *Radio Science*, 16(3):303-320, Mar. 1981.
- Tsang, L; Kong, J.A.; Shin, R.T. *Theory of microwave Remote sensing*. New York, NY, John Wiley and Sons, 1985. 611 p.
- Ulaby, F.T.; El-Rayes, M. A. Microwave dielectric spectrum of vegetation - Part II: Dual-dispersion model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-25(5):550-557, Sep. 1980.
- Ulaby, F. T.; Moore, R.K.; Fung, A.K. *Microwave remote sensing: Active and passive*. Reading, MA, Addison Wesley, 1981. v.1.

- Ulaby, F. T.; Moore, R.K.; Fung, A.K. **Microwave remote sensing: Active and passive.** Reading, MA, Addison Wesley, 1982. v.2.
- . **Microwave remote sensing: Active and passive.** Dedham, MA, Artech House. 1986. v.3.
- Viswanadham, Y. et al. Micrometeorological measurements in Amazon forest during GTE/ABLE 2A mission. **Journal of Geophysical Research**, 95(D9):13669-13682, Sept. 1990.
- Wigneron, J.P. **Modelisation du couvert végétal dans le domaine hyperfréquence passif.** Toulouse, CNES/LERTS. 1991a. 21p.
- Wigneron, J.P. **Modele continu de l'émission des couverts végétaux.** LERTS, 1991b. Comunicação pessoal.
- Wigneron et al. **Microwave emission of vegetation: Sensitivity of leaf characteristics.** Submetido para publicação no **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 1992.
- Wang, J.R. Shiue, J.C.; Chuang, S.L.; Shin, R.T. Dombrowski, M. **Thermal microwave emission from vegetated fields: a comparison between theory and experiment.** **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, GE-22(2): 143-150, Mar. 1984.

APÊNDICE A

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO DISCRETO

Neste apêndice são apresentados os resultados da análise de sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical, e da razão de polarização aos parâmetros de índice de área foliar (IAF), umidade das folhas (U_F), gradiente de temperatura da vegetação (Γ) e temperatura da superfície do solo (T_1) simuladas pelo modelo discreto, nas frequências de 18.0 GHz e 37.0 GHz.

O valor da umidade dos galhos, obtidos a partir da inversão do modelo discreto foi de 0.3. Esse valor é inferior aos obtidos em campo por Carvalho Júnior (1991), o que explica o não funcionamento desse modelo para as baixas frequências, onde a contribuição dos galhos é maior.

Como no modelo contínuo, fez-se a calibração dos parâmetros de estrutura da vegetação utilizados no modelo discreto (espessura das folhas (e), fração de difusão frontal para as polarizações vertical (α_v) e horizontal (α_h) e umidade das folhas (U_F)), para o dia juliano 100 (Tabela A.1). Como índice de área foliar, considerou-se o valor de 5.2 obtido em experimentos de campo nesta área estudo, por Jordan e Uhl (1978) e McWilliam et al. (1992).

Após a calibração, procedeu-se ao estudo de sensibilidade do modelo discreto, seguindo a mesma metodologia aplicada para o modelo contínuo (Capítulo 4).

TABELA A.1 - PARÂMETROS DE ESTRUTURA DA VEGETAÇÃO E UMIDADE
DAS FOLHAS CALIBRADOS PARA O DIA JULIANO 100
ATRAVÉS DO MODELO DISCRETO

| FREQÜÊNCIA (GHz) | UMIDADE DAS FOLHAS (U_F) | PARÂMETROS DE ESTRUTURA | | |
|---------------------|---------------------------------|-------------------------|------------|------------|
| | | e (m) | α_v | α_h |
| 18.0 | 0.83 | 0.0004 | 0.9585 | 0.9640 |
| 37.0 | 0.83 | 0.0004 | 0.9738 | 0.9734 |

As Figuras de A.1 a A.16 mostram os resultados da variação e da sensibilidade da temperatura de brilho com polarização vertical e da razão de polarização em função dos parâmetros de índice de área foliar, umidade das folhas, gradiente de temperatura da vegetação e temperatura da superfície, simuladas pelo modelo discreto.

A sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical, e da RP ao índice de área foliar, no modelo discreto, teve um comportamento similar à sensibilidade da TB_v e da RP, à fração volumétrica no modelo contínuo, para as freqüências de 18.0 e 37.0 GHz. A sensibilidade da TB_v e da RP aos demais parâmetros (umidade, gradiente de temperatura e temperatura da superfície) teve um comportamento similar nos dois modelos.

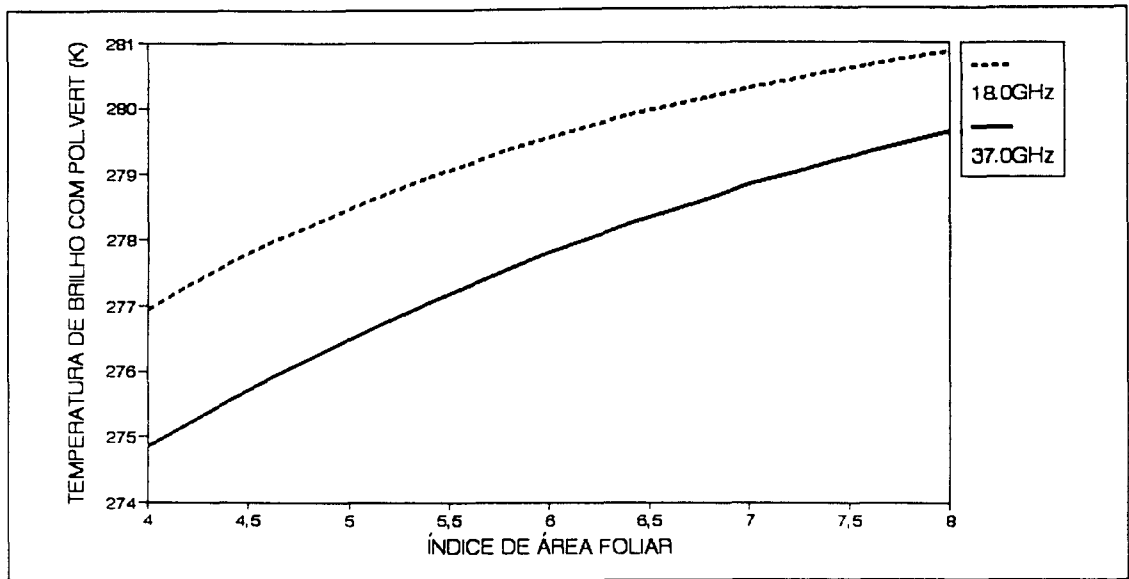


Fig. A.1 -Variação da temperatura de brilho, com polarização vertical, como função do índice de área foliar, simulada pelo modelo discreto.

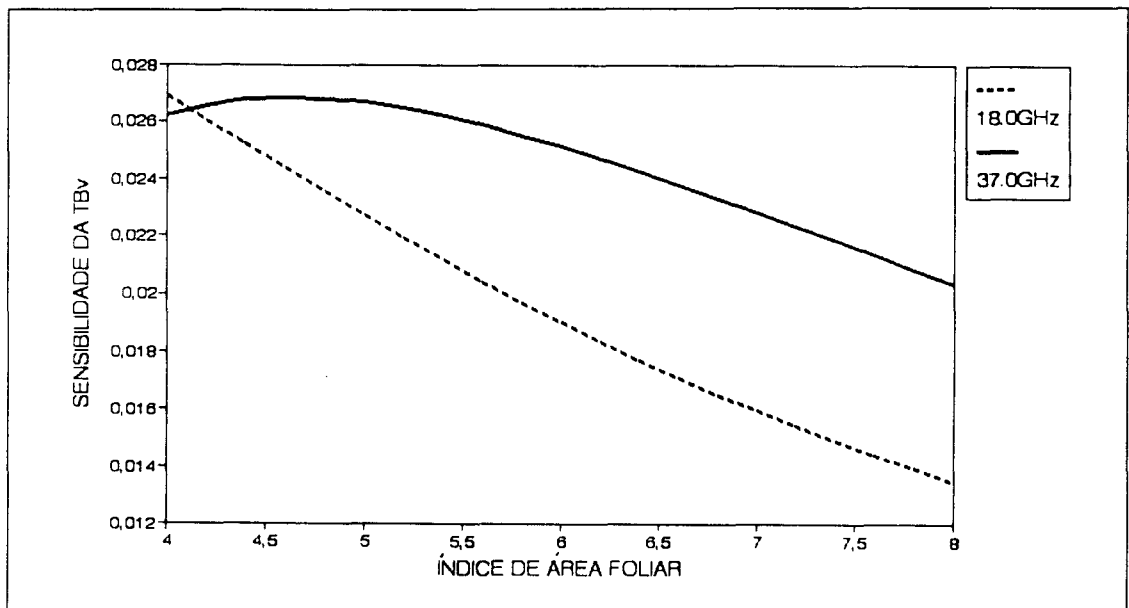


Fig. A.2 -Sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical, ao índice de área foliar, simulada modelo discreto.

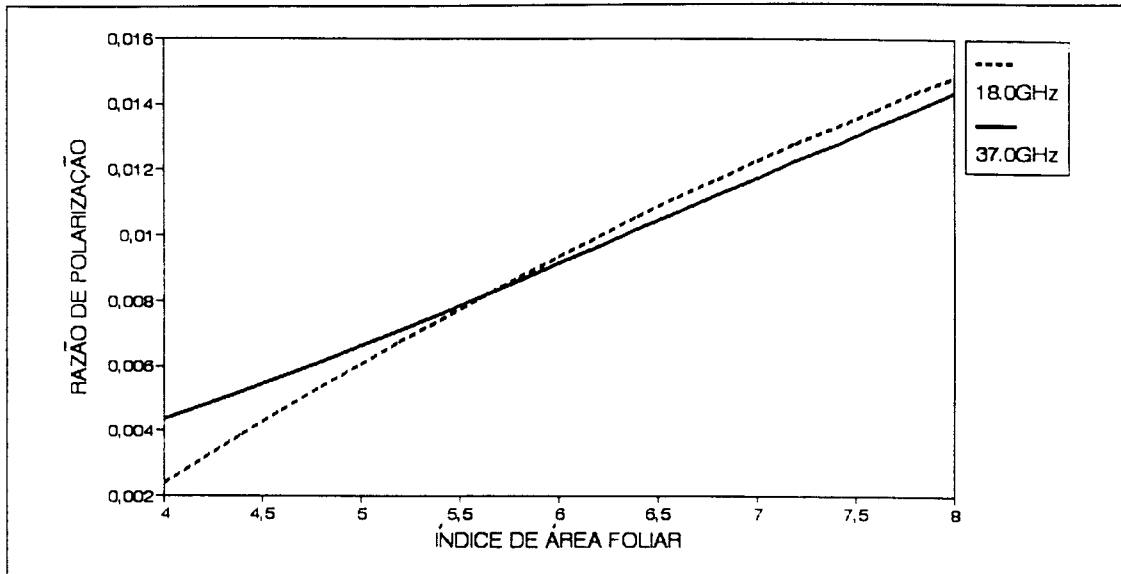


Fig. A.3 -Variação da razão de polarização, como função do índice de área foliar, simulada pelo modelo discreto.

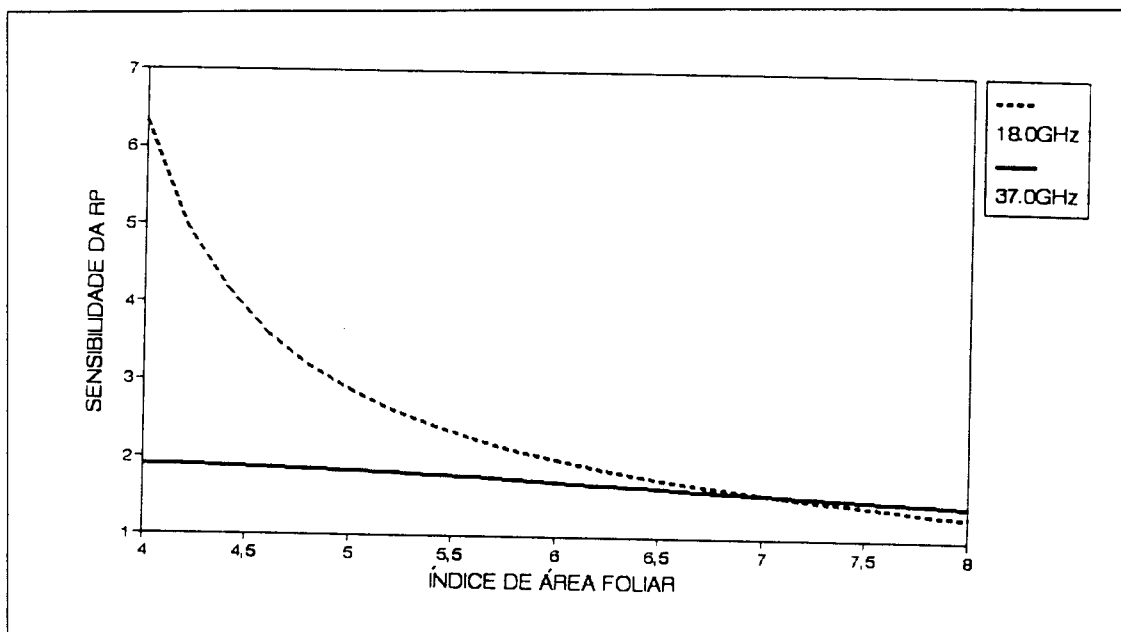


Fig. A.4 - Sensibilidade da razão de polarização ao índice de área foliar, simulada pelo modelo discreto.

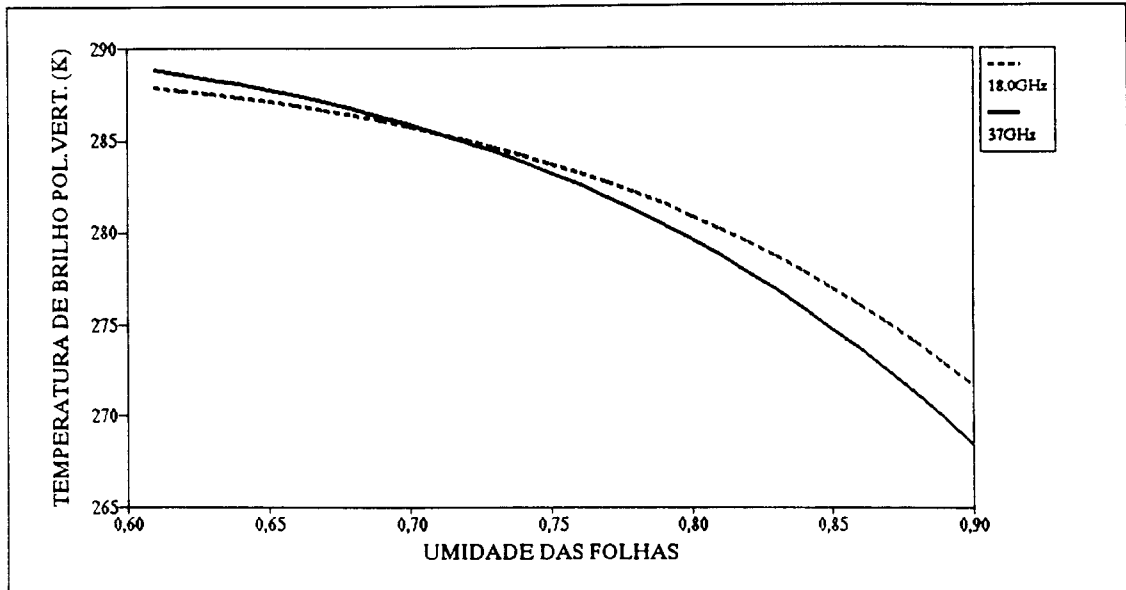


Fig. A.5 - Variação da temperatura de brilho, com polarização vertical, como função da umidade das folhas, simulada pelo modelo discreto.

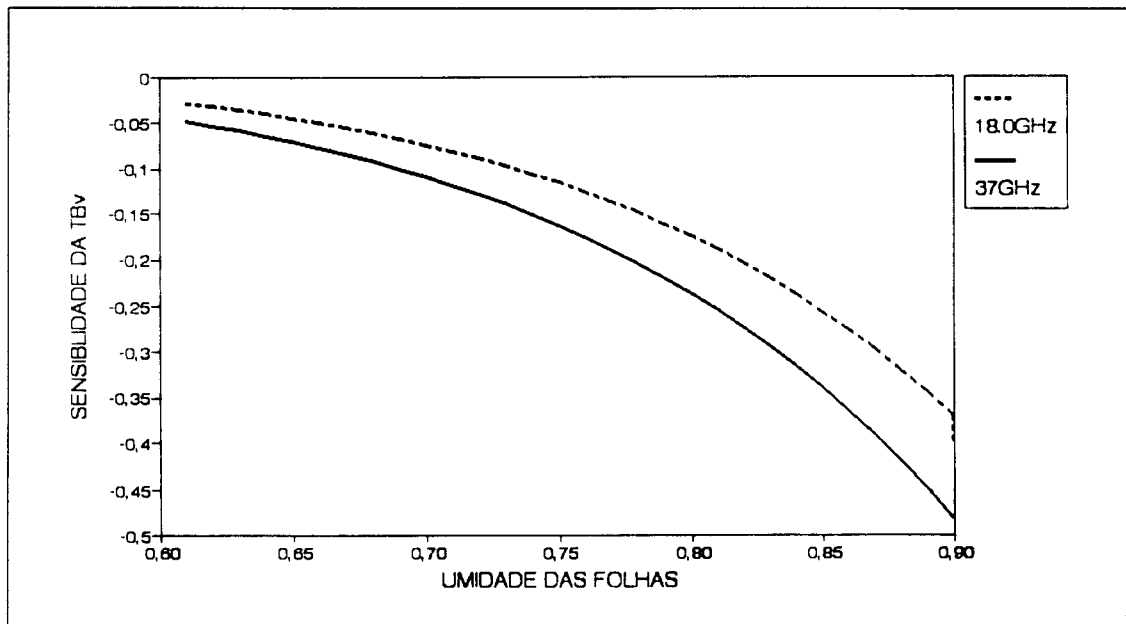


Fig. A.6 - Sensibilidade da temperatura de brilho com polarização vertical à umidade das folhas, simulada pelo modelo discreto.

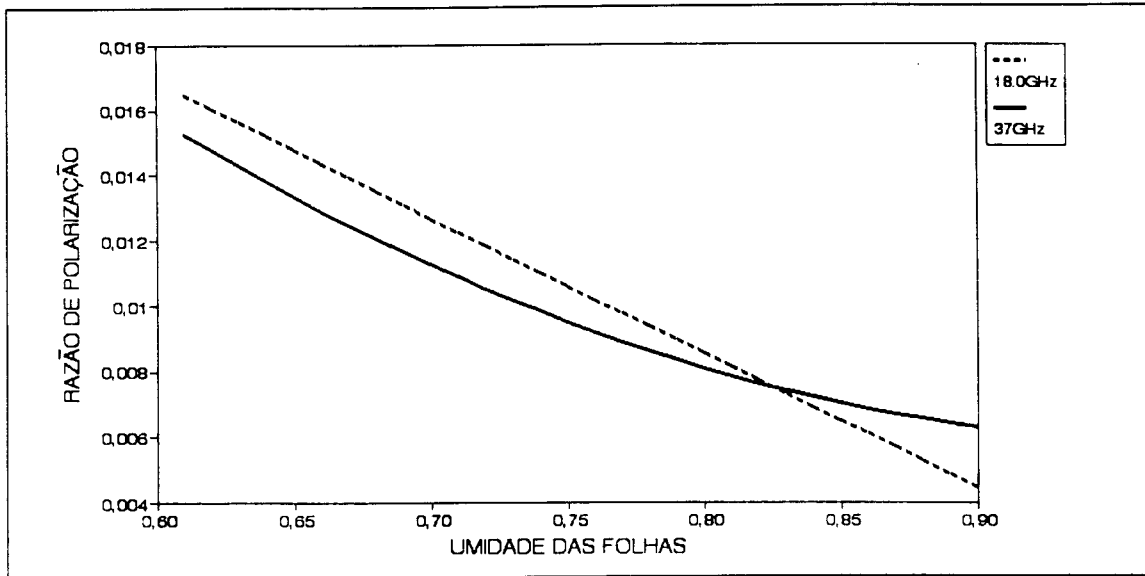


Fig. A.7 -Variação da razão de polarização, como função da umidade das folhas, simulada pelo modelo discreto.

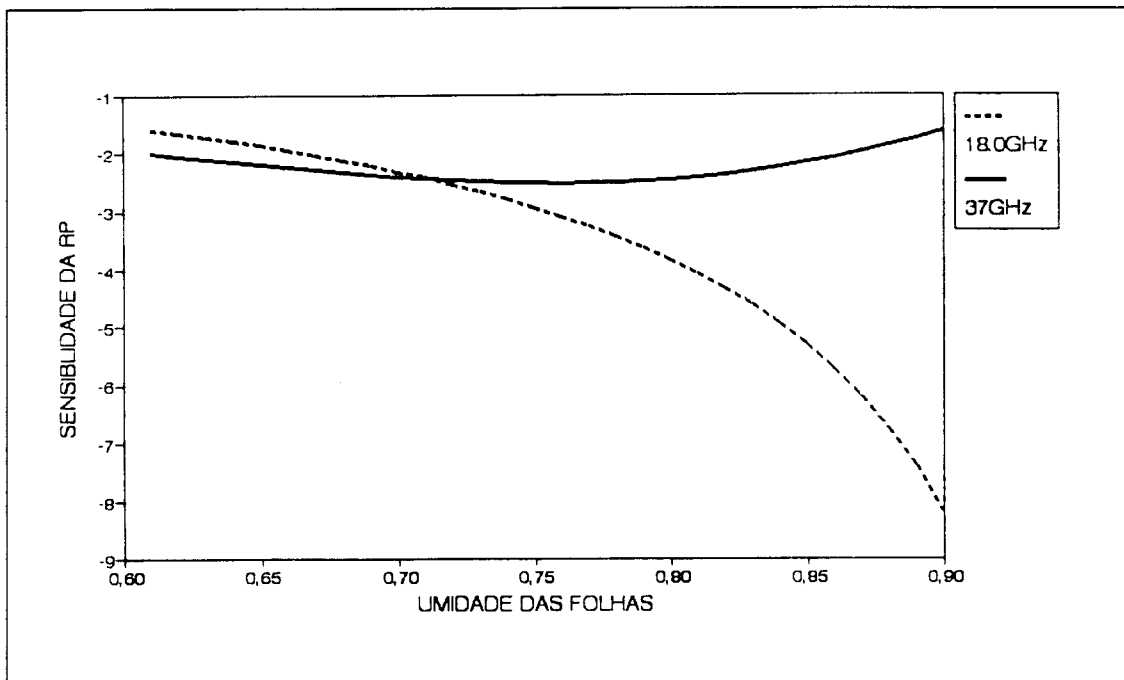


Fig. A.8 -Sensibilidade da razão de polarização à umidade das folhas, simulada pelo modelo discreto.

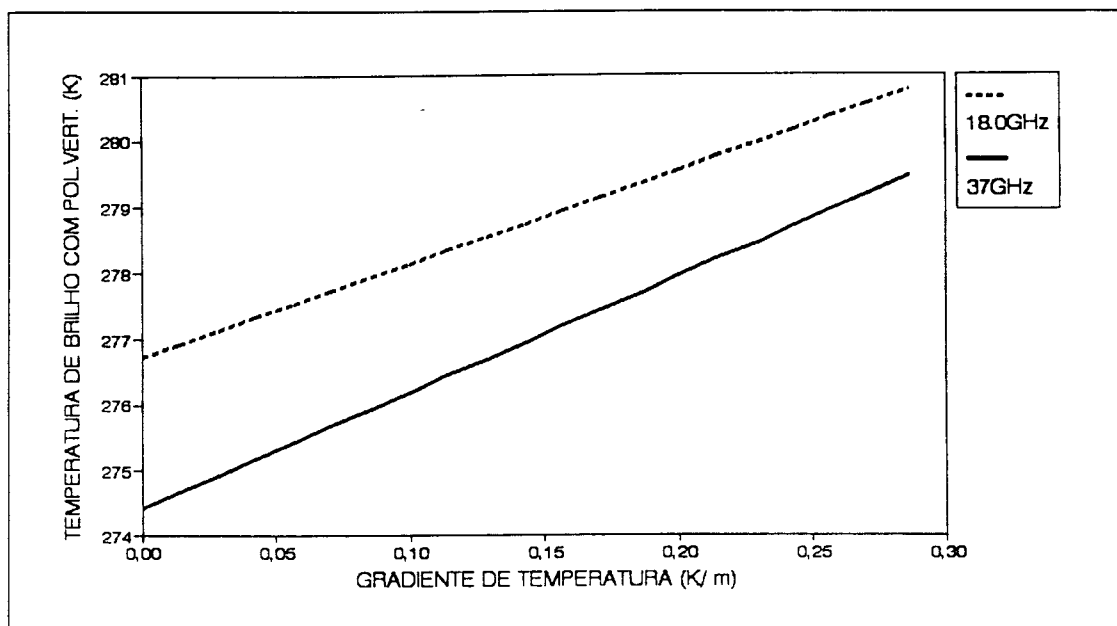


Fig. A.9 -Variação da temperatura de brilho, com polarização vertical, como função do gradiente de temperatura da vegetação, simulada pelo modelo discreto.

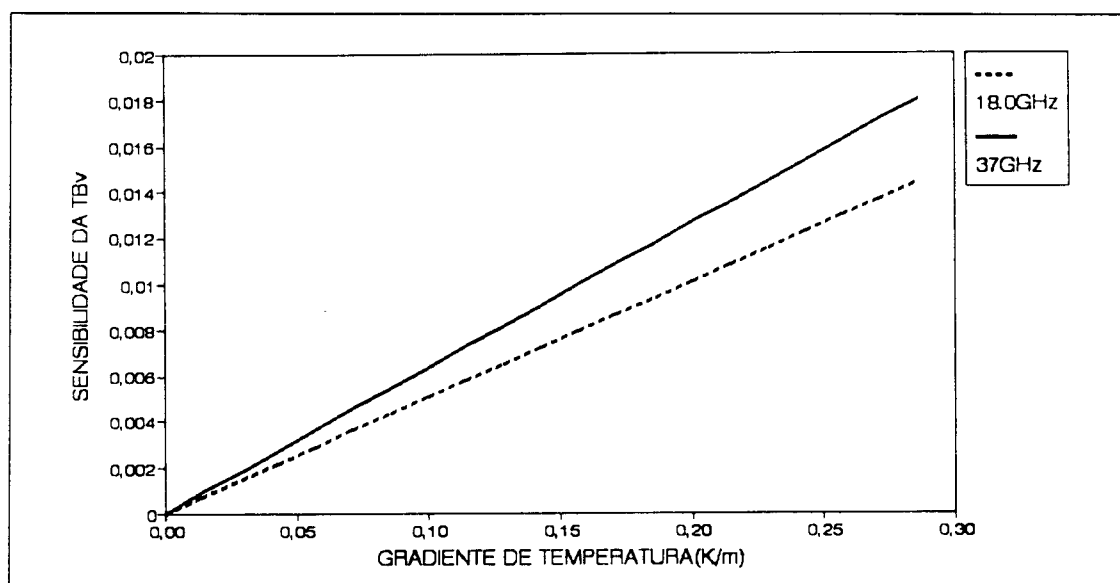


Fig. A.10 -Sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical, ao gradiente de temperatura, simulada pelo modelo discreto.

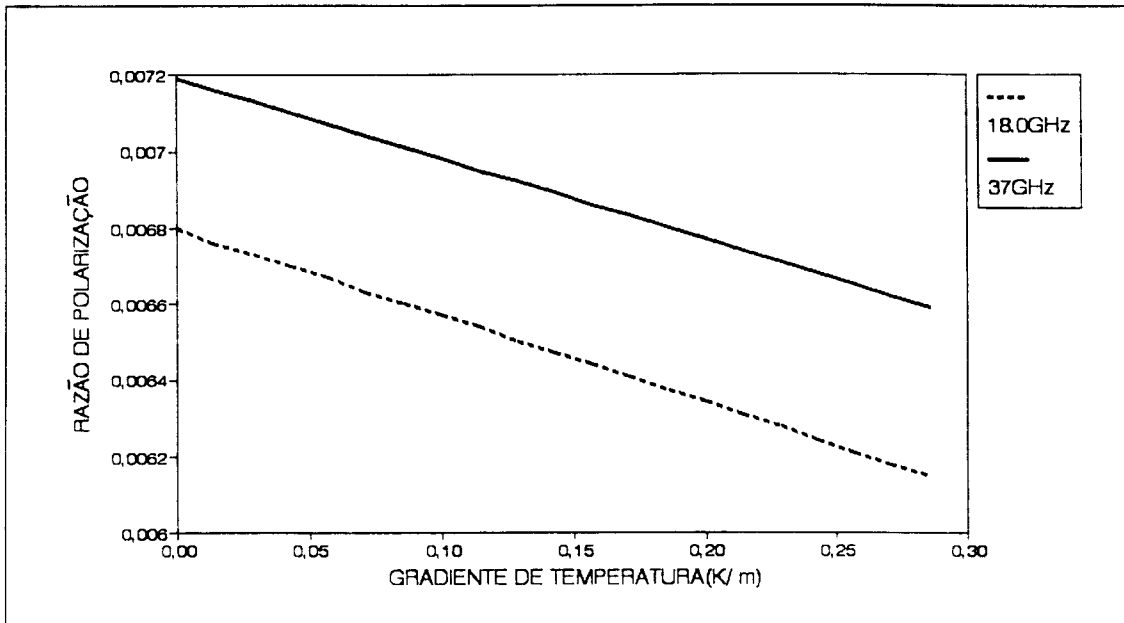


Fig. A.11 -Variação da razão de polarização, como função do gradiente de temperatura da vegetação, simulada pelo modelo discreto.

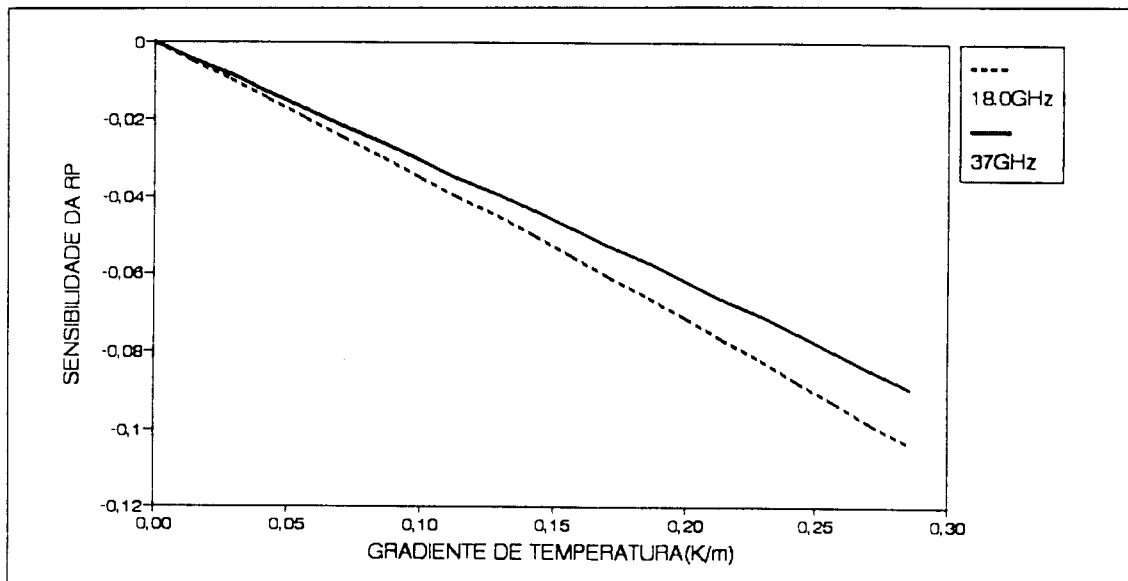


Fig. A.12 -Sensibilidade da razão de polarização ao gradiente de temperatura da vegetação, simulada pelo modelo discreto.

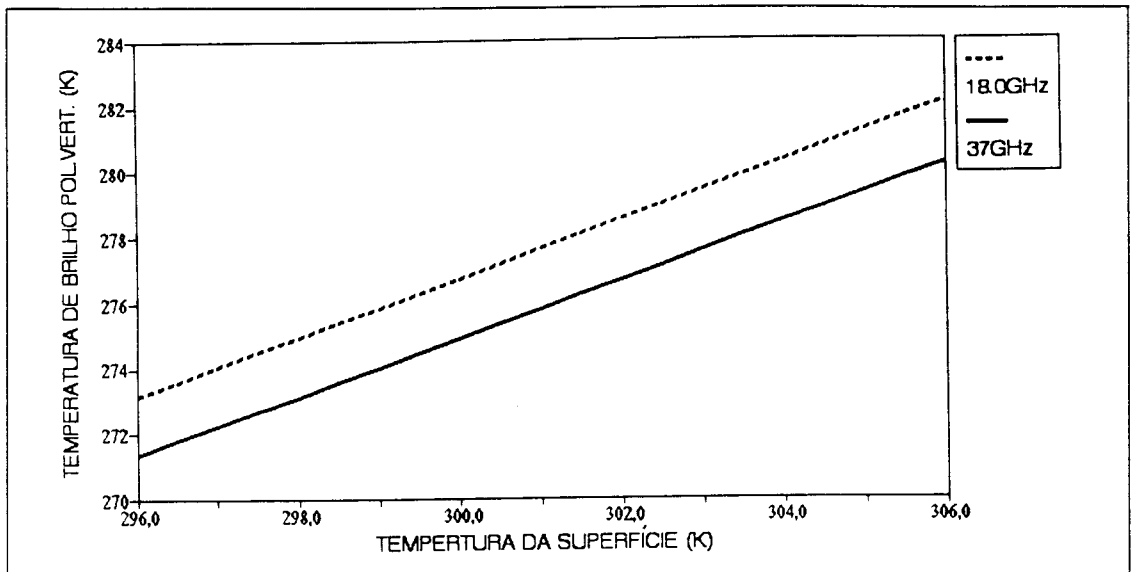


Fig. A.13 -Variação da temperatura de brilho, com polarização vertical, como função da temperatura da superfície, simulada pelo modelo discreto.

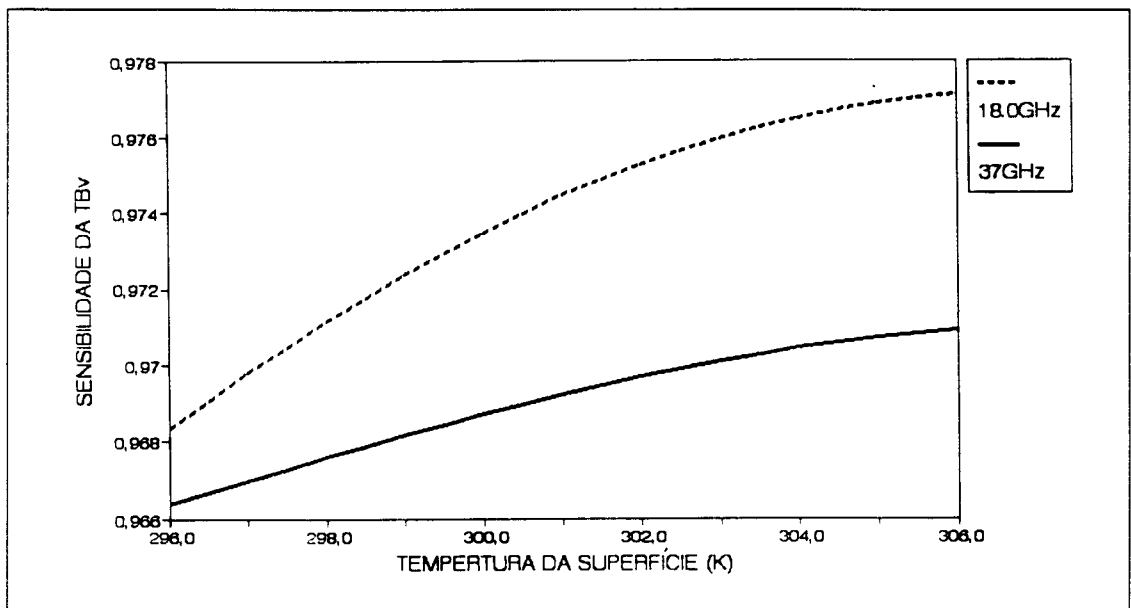


Fig. A.14 -Sensibilidade da temperatura de brilho, com polarização vertical, à temperatura da superfície, simulada pelo modelo discreto.

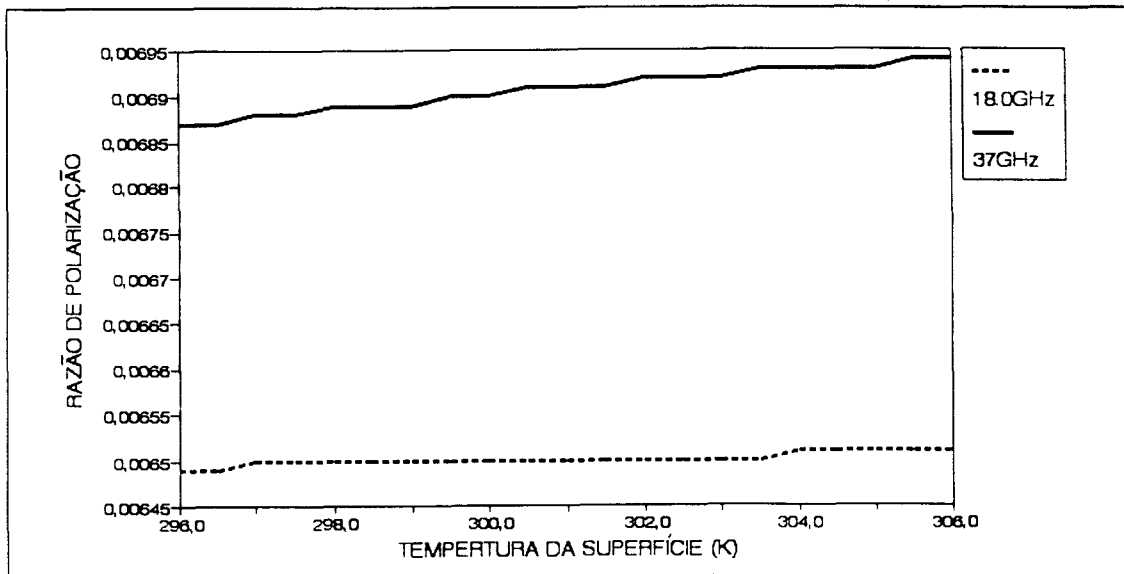


Fig. A.15 -Variação da razão de polarização, como função da temperatura da superfície, simulada pelo modelo discreto.

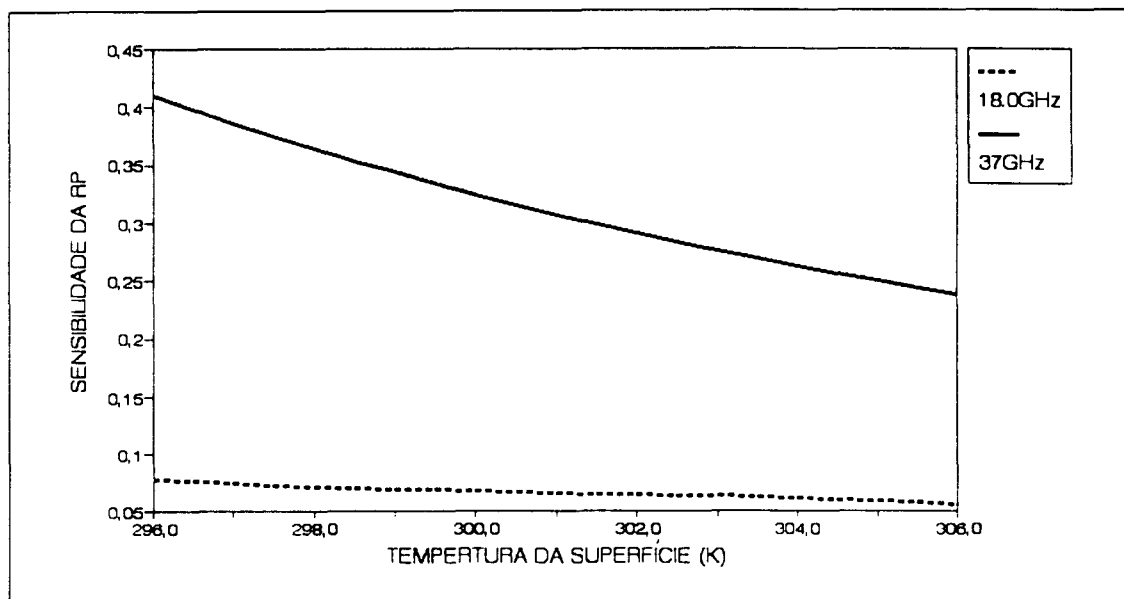


Fig. A.16 -Sensibilidade da razão de polarização à temperatura da superfície, simulada pelo modelo discreto.