

**JULIO CESAR R. DAL BELLO**

**CARACTERIZAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA  
VEGETAÇÃO NOS SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES  
MÓVEIS CELULARES EM ÁREAS URBANAS**

**Tese apresentada no Departamento de  
Engenharia Elétrica da PUC/RJ como  
parte dos requisitos para obtenção do  
título de Doutor em Ciências de  
Engenharia Elétrica.**

**Orientador: GLÁUCIO LIMA SIQUEIRA**

**Departamento de Engenharia Elétrica da  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro**

**Rio de Janeiro, 06 de fevereiro de 1998**

Dedico este trabalho:

A meus pais **MÁRIO** ( in memoriam ) e

**ODETTE** ( que doou mais de 40  
anos de sua vida à  
nobre causa do ensino ),

À minha esposa **MABEL** e

A meus filhos **LUIZ GUSTAVO,**  
**LUIZ HENRIQUE** e  
**MARCELLA**

## AGRADECIMENTOS

A realização de um trabalho de investigação desta natureza e envergadura, com “ciclo” científico completo ( execução dos experimentos em campo, processamento computacional dos dados e análise dos resultados à luz da teorias existentes ), só é possível graças à colaboração e participação efetiva daqueles que, de alguma forma, estejam envolvidos ou interessados no tema em estudo. Assim sendo, desejo expressar meu mais profundo agradecimento, em reconhecimento ao apoio recebido, às seguintes pessoas e instituições:

- À minha família e, em especial, à minha esposa **Mabel** e a meus filhos, **Luiz Gustavo**, **Luiz Henrique** e **Marcella**, pelo incentivo que recebi e pela paciência e compreensão em função das muitas horas que tive que dedicar à realização deste trabalho;

- Ao professor **Gláucio Lima Siqueira**, orientador deste trabalho e principal incentivador de sua realização, desde a fase de concepção. Cabe ao professor Gláucio o mérito da idéia de buscar nas tradicionais teorias estatísticas e determinísticas os subsídios necessários para caracterizar a influência da vegetação nos Sistemas Celulares, com comprovação experimental. Seu contagiante entusiasmo pelo tema e sua elevada competência profissional, aliados aos seu sólidos conhecimentos da matemática e da estatística, resultaram numa orientação segura e eficaz. Em nenhum momento o professor Gláucio deixou de dar-me a devida assistência, mesmo no período em que estive na Polytechnic University

realizando o processamento dos dados, tendo lá estado para acompanhar pessoalmente o andamento das pesquisas em duas ocasiões distintas. Sua contribuição para a finalização deste trabalho foi decisiva;

- Ao professor **Henry L. Bertoni**, orientador dos trabalhos de pesquisa e processamento dos dados na Polytechnic University, pela condução clara e objetiva dos trabalhos que realizei no laboratório de radiopropagação do CATT - Center for Advanced Technologies in Telecommunications;

- Ao professor **T. Tamir**, conhecedor profundo da propagação em florestas, pelas oportunidades proporcionadas de entabulamento de discussões técnicas relativas ao tema da pesquisa;

- A **Alice R. M. da Silva**, **Renata T. Martins** e **Fernanda M. Abreu** ( da UFF ); a **Eduardo J. A. Vasquez**, **Renato A. Gomes**, **Claudio B. Sampaio** e **Daniel A. Borghi** ( do CETUC- PUC/RJ ) e a **Maurício H. C. Dias** ( do IME ) pela valiosa colaboração prestada para realização dos testes de propagação no Campo de Santana, no Rio de Janeiro, e conversão analógico-digital dos arquivos resultantes das medições;

- A **Lenny** ( americano ) e **George** ( canadense ), pelas produtivas discussões técnicas e sugestões apresentadas em relação ao programa STADIS e pelo agradável convívio durante um ano no laboratório de radiopropagação do CATT. A **Min** e **Dong Soo** ( coreanos ) pela agradável companhia no CATT;

- A **Marcelo R. Jimenez**, do CETUC, pelo apoio computacional proporcionado para a finalização deste trabalho e

- Ao **CNPq** por ter fornecido a bolsa de estudos que possibilitou a realização da análise dos dados na Polytechnic University.

## RESUMO

O conhecimento profundo de como o meio-ambiente influencia na radiopropagação, objetivando o aumento da capacidade e da cobertura de Sistemas de Comunicações Móveis Celulares, tem motivado inúmeros estudos relativos ao tema. Conforme pode ser observado na literatura técnica, estes estudos têm se concentrado na caracterização da influência das edificações na propagação do sinal. Poucos estudos relacionados à influência da vegetação têm sido relatados, considerando-a como parte integrante dos ambientes urbanos. T. Tamir, na década de 60, utilizando a teoria rigorosa da propagação em camadas múltiplas desenvolvida por L.M. Brekhovskikh, propôs aproximações de ordem prática que permitiram a utilização de seus modelos na implementação de radioenlaces operando em ambientes de florestas. Seus modelos foram desenvolvidos para a faixa de frequências de 2 a 200 MHz, para radioenlaces fixos e, conseqüentemente, não consideram os desvanecimentos lento e rápido que normalmente estão presentes nos sistemas celulares e provocam a deterioração da qualidade do sinal recebido. Apesar disso, alguns autores, sem qualquer comprovação experimental, têm se valido de extensões dos modelos de Tamir para prever a cobertura dos sistemas celulares.

Este trabalho enfocou a caracterização da influência da vegetação típica dos ambientes urbanos nos Sistemas de Comunicações Móveis Celulares, concentrando esforços na caracterização e análise dos desvanecimentos rápidos ( estatística de pequena escala ) provocados pela propagação por multipercurso, à luz de resultados de testes de propagação

realizados no Campo de Santana. Os modelos propostos por Tamir foram testados para se verificar o seu grau de aderência às medições realizadas.

A dependência do sinal recebido em ambiente de parque com a altura de transmissão, frequência e polarização foi determinada. Foram feitas, também, algumas considerações sobre os modelos propostos por R. Lang, que se aplicam à propagação de sinais incoerentes em regiões de florestas.

## ABSTRACT

The knowledge of how the environment affects radio propagation in order to increase the Cellular Mobile Communication Systems capacity and coverage has led to a great number of related studies. As can be seen in the technical literature, these studies have been concentrated on the characterization of the influence of buildings on signal propagation. For this characterization, the vegetation, as a part of the urban environment, was not considered. T. Tamir has proposed, based on the rigorous propagation theory of multiple layers due to L.M. Brekhovskikh, some practical approximations which has allowed him to develop models for radio links operating on forest environments. His models were developed for the 2 to 200 MHz range fixed links and hence the fast and slow fading conditions, generally present on mobile systems, weren't considered. Even so, some authors use Tamir's model extensions to account for the coverage of cellular mobile systems without any experimental proof.

This work has addressed the characterization of how the typical vegetation of urban environments affects Cellular Mobile Communication Systems. Great efforts have been made on the fast fading studies through statistical small-scale variations due to the multipath propagation condition. The Tamir models were tested against the experimental data collected in Campo de Santana.

The received signal dependence on transmitter height, frequency and polarization were determined. Also the models proposed by R. Lang for incoherent reception inside forests, were investigated.

# ÍNDICE

Lista de Tabelas .....	xiii
Lista de Figuras .....	xiv
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	
1.1 Histórico .....	3
1.2 Revisão bibliográfica .....	5
1.3 Evolução do sistema celular .....	8
1.4 Objetivo .....	17
1.5 Roteiro .....	20
<b>2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA</b>	
2.1 Considerações sobre o ambiente urbano .....	26
2.2 Casos de incidência de florestas em ambientes urbanos .....	30
2.2.1 Árvore isolada .....	32
2.2.2 Linhas de árvores paralelas aos edifícios .....	35
2.2.3 Floresta limitada de forma definida .....	38
2.2.4 Floresta extensa .....	44
2.3 Caracterização do canal rádio-móvel	
2.3.1 Considerações sobre a propagação por multipercurso ..	48
2.3.2 Canais deterministicamente variantes no tempo .....	50
2.3.3 Canais aleatoriamente variantes no tempo .....	55
2.3.4 Canais reais .....	57

### **3. CONCEITUAÇÕES ESTATÍSTICAS E DETERMINÍSTICAS**

#### 3.1 Principais distribuições estatísticas utilizadas

3.1.1 Estatística de pequena escala ..... 65

3.1.2 Estatística de larga escala ..... 69

#### 3.2 Modelo de camadas superpostas

3.2.1 Modelo Idealizado de Tamir ( campos coerentes ) .... 73

3.2.2 Modelo Idealizado de Lang ( campos incoerentes )... 83

### **4. MEDIDAS REALIZADAS NO CAMPO DE SANTANA**

4.1 Caracterização do meio-ambiente ..... 89

4.2 Rotina de testes utilizada ..... 92

4.3 Pré-processamento das medidas ..... 95

### **5. ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS MEDIDAS**

5.1 Programa desenvolvido ( STADIS ) ..... 119

5.2 Análise do desvanecimento rápido ..... 122

5.3 Análise da variação da média do campo recebido ..... 157

### **6. ANÁLISE DETERMINÍSTICA DAS MEDIDAS**

6.1 Determinação da atenuação de percurso ..... 163

6.2 Determinação do ganho de altura ..... 174

6.3 Considerações sobre a polarização ..... 179

6.4 Resultados obtidos com o modelo de Tamir .....	182
<b>7. CONCLUSÕES</b> .....	188
Sugestões para futuros trabalhos .....	193
 <b>APÊNDICES</b>	
 <b>A. Setup utilizado nos testes de propagação</b>	
A.1 Sistema básico .....	196
A.2 Antenas utilizadas .....	204
A.3 Unidade móvel .....	206
 <b>B. Software STADIS</b> .....	218

## LISTA DE TABELAS

Tab 2.1 - Parâmetros descritivos das classes 2 e 3 .....	30
Tab 2.2 – Classificação da vegetação no ambiente urbano .....	31
Tab 4.1 -Tipos de árvores presentes no Campo de Santana .....	90
Tab 4.2 - Códigos utilizados na organização dos dados .....	98
Tab 4.3 - Banco de dados ( Matrizes MTX ) .....	102
Tab 4.4-a a 4.4-c Relatório da eliminação de arquivos .....	103 a 105
Tab 5.1-a a 5.1-e Fator K da distribuição Riceana .....	133 a 137