CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

# ANÁLISE CRÍTICA DO MODELO DE PROPAGAÇÃO ITU-R P.1812 PARA REDES LoRaWAN

Bryan da Silva Duarte

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Maurício Henrique Costa Dias

Rio de Janeiro
Julho de 2023

ANÁLISE CRÍTICA DO MODELO DE PROPAGAÇÃO ITU-R P.1812 PARA REDES LoRaWAN

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Bryan da Silva Duarte

Aprovada por:

Documento assinado digitalmente
gov.br
MAURICIO HENRIQUE COSTA DIAS
Data: 18/07/2023 10:36:10-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Presidente, Professor Dr. Maurício Henrique Costa Dias (CEFET/RJ) (orientador)

Documento assinado digitalmente
gov.br
JOAO TERENCIO DIAS
Data: 18/07/2023 11:23:15-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Professor Dr. João Terêncio Dias (CEFET/RJ)

Documento assinado digitalmente
gov.br
PEDRO VLADIMIR GONZALEZ CASTELLANC
Data: 27/07/2023 16:45:09-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Professor Dr. Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos (UFF)

Rio de Janeiro
Julho de 2023

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

D812 Duarte, Bryan da Silva
Análise crítica do modelo de propagação ITU-R P.1812 para redes LoRaWAN / Bryan da Silva Duarte – 2023.
xiii, 76f. il. (algumas color.) + apêndices. , enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2023.
Bibliografia : f. 73-76.
Orientador: Maurício Henrique Costa Dias.

1. Engenharia elétrica. 2. Modelos de propagação. 3. Modelo ITU-R P.1812. 4. LoRaWAN. I. Dias, Maurício Henrique Costa (Orient.). II. Título.

CDD 629.8323

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes – CRB/7 nº 5281

# DEDICATÓRIA

“Dedico esta dissertação à minha mãe, que sempre me apoiou e esteve do meu lado, me motivando a seguir os meus sonhos e me superar.”

# AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi resultado do meu esforço, mas com a ajuda daqueles que, direta ou indiretamente, tornaram cada uma das etapas possível. Não posso deixar de agradecer:

À DEUS, por abrir as portas da minha vida para esta oportunidade. À minha mãe, Fabíola, por me apoiar durante todo o processo, me incentivando a fazer o meu melhor.

Ao meu orientador, professor Dr. Maurício, pelos valiosos ensinamentos, apoio e amizade, e à Instituição, pelo recebimento da bolsa de estudos, durante os períodos iniciais desta etapa.

À professora Dra. Ana Elisa Ferreira, por prover informações adicionais valiosas para realização de parte dos meus testes.

# RESUMO

ANÁLISE CRÍTICA DO MODELO DE PROPAGAÇÃO ITU-R P.1812 PARA REDES LoRaWAN

Bryan da Silva Duarte

Orientador:
Maurício Henrique Costa Dias

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

No panorama atual, as tecnologias de comunicação tornaram-se parte integrante da sociedade, possibilitando não somente a transferência de informações, globalmente, entre humanos e máquinas, como também contribuindo para o advento da Internet das Coisas. Neste contexto, de conectividade dos mais diversos dispositivos, sejam eles de utilidade doméstica ou pública, destacam-se as mais variadas soluções, dentre elas o ramo das tecnologias LPWAN, por proporcionar comunicação de longo alcance, com baixo consumo de energia, por meio de dispositivos com custo relativamente reduzido. Dentre essas técnicas, uma que se tornou altamente atrativa no mercado foi a das redes LoRaWAN, ganhando espaço em áreas como: cidades inteligentes, indústria e monitoramento ambiental. No que tange aos projetos de redes LoRaWAN, normalmente adotam-se modelos de propagação utilizados para o planejamento de redes celulares, que possuem menor aderência a essa tecnologia LPWAN, por conta de suas particularidades, o que pode ocasionar efeitos prejudiciais à funcionalidade dessas redes, depois de implementadas. Meios para solucionar o problema incluem duas principais linhas de ação: o desenvolvimento de novos modelos ou o ajuste de técnicas pré-existentes às características da solução LoRaWAN. Neste trabalho, é adotada a segunda linha de ação, definindo como modelo de análise a recomendação ITU-R P.1812. Duas abordagens de tratamento de dados são postas à prova: uma mais complexa, denominada abordagem 1, que realiza a avaliação, ponto a ponto, e um método simplificado, denominado abordagem 2, que generaliza os dados entre terminais. É realizada uma análise comparativa de dados estatísticos, para ambas as soluções, utilizando informações de três bancos de dados distintos, juntamente com uma alternativa para predição em redes LoRaWAN, o modelo de Egli. Os resultados sugerem que a escolha pela abordagem 2 pode ser mais favorável para ambientes rurais, com características mais simples de cobertura do solo, enquanto a abordagem 1 se ressalta para cenários mais complexos. Não obstante, para estes últimos, os dados obtidos sugerem possibilidade de adoção da abordagem 2, como boa alternativa, a depender do grau de criteriosidade do projetista.

Palavras-chave:
Modelos de propagação; Modelo ITU-R P.1812; LoRaWAN.

Rio de Janeiro
Julho de 2023

# ABSTRACT

CRITICAL ANALYSIS OF ITU-R P.1812 PROPAGATION MODEL FOR LoRaWAN NETWORKS

Bryan da Silva Duarte

Advisor:
Maurício Henrique Costa Dias

Abstract of dissertation submitted to Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

In the current scenario, communication technologies have become an integral part of society, enabling not only the transfer of information globally between humans and machines, but also contributing to the advent of Internet of Things. In this context, of connectivity between the most diverse devices, whether for domestic or public use, various solutions stand out, among them the group of LPWAN technologies, for providing long-range communication, with low energy consumption devices at a relatively low cost. Between these techniques, one that has become highly attractive in the market is LoRaWAN networks, gaining space in areas such as: smart cities, industry, and environmental monitoring. Regarding LoRaWAN network projects, propagation models used for planning cellular networks are usually adopted, which have less adherence to this LPWAN technology, due to their particularities, which could cause harmful effects to the functionality of these networks, after their implementation. Means for solving this problem include two main lines of action: the development of new models, or the adjustment of pre-existing techniques, considering the characteristics of the LoRaWAN solution. In this work, the second line of action is adopted, defining ITU-R P.1812 recommendation as the analysis model. Two data processing approaches are tested: a more complex one, called approach 1, which performs the evaluation, point by point, and a simplified method, called approach 2, which generalizes the data between terminals. A comparative analysis of statistical data is performed for both solutions, using information from three different databases, along with an alternative for prediction in LoRaWAN networks, the Egli model. The results suggest that the choice for approach 2 may be more favorable for rural environments, with simpler land cover characteristics, while approach 1 stands out for more complex scenarios. However, for the latter, the data obtained suggest the possibility of adopting approach 2, as a good alternative, depending on the designer’s criteria.

Keywords:
Propagation models; ITU-R P.1812 model; LoRaWAN.

Rio de Janeiro
Julho de 2023

# SUMÁRIO

1. Introdução 14
1.1 – Motivação 16
1.2 – Dificuldades na área 17
1.3 – Problemas em constante estudo e o problema de interesse 18
1.4 – Estado da Arte 20
1.5 – Limitação da literatura 23
1.6 – Hipótese 23
1.7 – Objetivos 24
1.8 – Organização 24
2. Modelos de Propagação 26
2.1 – Conceitos Gerais 26
2.2 – Escolha de modelos de propagação apropriados 27
2.3 – Descrição dos modelos selecionados 30
2.3.1 – Modelo de Egli 30
2.3.2 – Modelo ITU-R P.1812 31
3. Metodologia de Trabalho 34
3.1 – Descrição geral da metodologia 34
3.2 – Descrição das campanhas de medição 35
3.2.1 – Banco de dados 1: Minas Gerais 35
3.2.2 – Banco de dados 2: Finlândia 38
3.2.3 – Banco de dados 3: Rio de Janeiro 40
3.3 – Algoritmo de análise de dados 42
3.4 – Abordagens de tratamento de dados de entrada de *clutter* 45
3.4.1 – Abordagem 1 45
3.4.2 – Abordagem 2 46
4. Análise e resultados 48
4.1 – Conceitos para avaliação dos dados 48
4.2 – Testes para o banco de dados 1 50
4.3 – Testes para o banco de dados 2 53
4.4 – Testes para o banco de dados 3 55
4.5 – Conclusões da análise 58
4.6 – A escolha do modelo P.1812-5, em face da nova versão P.1812-6 59
4.6.1 – ITU-R P.1812-5 e ITU-R P.1812-6: teste com banco de dados 1 61
4.6.2 – ITU-R P.1812-5 e ITU-R P.1812-6: teste com banco de dados 2 64
4.6.3 – ITU-R P.1812-5 e ITU-R P.1812-6: teste com banco de dados 3 67

5. Considerações Finais 70
Referências Bibliográficas 73
Apêndice I 77
Apêndice II 104

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

**Figura 1** – Comparação entre tecnologias IoT quanto à taxa de transmissão / consumo de energia e alcance do sinal (adaptado de KEYSIGHT, 2020) 15

**Figura 2** – Variação do sinal de recepção com a distância, com componentes de Multipercurso, Sombreamento e Perda com a distância (LIU *et al.*, 2008) 18

**Figura 3** – Posicionamento dos terminais e dos enlaces da campanha de medição em MG (adaptado de BUENO, 2021) 36

**Figura 4** – Procedimento para extração dos dados de perda de caminho a partir do gráfico (adaptado de BUENO, 2021) 37

**Figura 5** – Localização da BS e dos pontos de medição do banco de dados 2, imagem do Google Earth 39

**Figura 6** – Exemplos de coberturas do solo, para a região de Espoo, Finlândia 39

**Figura 7** – Localização dos Transmissores e Receptores na campanha de medição do banco de dados 3 41

**Figura 8** – Estrutura geral dos códigos Octave elaborados 43

**Figura 9** – Demonstração da abordagem 2 por análise visual da cobertura do solo no enlace 47

**Figura 10** – Exibição dos dados de saída para o banco de dados 1 utilizando a abordagem 1 (polarizações horizontal/vertical): (a) *PL* previstos e amostras de medição; (b) *PL* previstos e médias das medições 50

**Figura 11** – Exibição dos dados de saída para o banco de dados 1 utilizando a abordagem 2 (polarizações horizontal/vertical): (a) *PL* previstos e amostras de medição; (b) *PL* previstos e médias das medições 51

**Figura 12** – Exibição dos dados de saída para o banco de dados 2 (polarizações horizontal/vertical): (a) abordagem 1; (b) abordagem 2 54

**Figura 13** – Exibição dos dados de saída do banco de dados 3 (polarização vertical): (a) abordagem 1; (b) abordagem 2 56

# LISTA DE TABELAS

**Tabela 1** – Comparação entre LoRaWAN, SigFox, NB-IoT e LTE-M (adaptado de SILVA *et al.*, 2017) 16

**Tabela 2** – Possíveis lacunas dos trabalhos obtidos 22

**Tabela 3** – Comparação entre modelos de propagação 27

**Tabela 4** – Parâmetros de configuração do dispositivo LoRa em (BUENO, 2021) 36

**Tabela 5** – Parâmetros do dispositivo LoRa na campanha de medição do banco de dados 3 41

**Tabela 6** – Valores de potência recebida média e perda de caminho para os 5 enlaces considerados do banco de dados 3 42

**Tabela 7** – Alturas representativas de clutter consideradas nas abordagens 1 e 3, de acordo com o tipo de cobertura do solo (ITU-R, 2019) 46

**Tabela 8** – Resultados numéricos para o banco de dados 1 (FSPL, Egli, ITU-R P.1812, abordagens 1 e 2, polarizações horizontal/vertical) 52

**Tabela 9** – Resultados numéricos para o banco de dados 2 (FSPL, Egli, ITU-R P.1812, abordagens 1 e 2, polarizações horizontal/vertical) 54

**Tabela 10** – Resultados numéricos para o banco de dados 3 (FSPL, Egli, ITU-R P.1812, abordagens 1 e 2, polarização vertical) 57

**Tabela 11** – Comparação das duas versões da P.1812: banco de dados 1, abordagem 1, pol. horiz. 62

**Tabela 12** – Comparação das duas versões da P.1812: banco de dados 1, abordagem 1, pol. vert. 62

**Tabela 13** – Comparação das duas versões da P.1812: banco de dados 1, abordagem 2, pol. horiz. 63

**Tabela 14** – Comparação das duas versões da P.1812: banco de dados 1, abordagem 2, pol. vert. 64

**Tabela 15** – Comparação das duas versões da P.1812: banco de dados 2, abordagem 1, pol. horiz. 65

**Tabela 16** – Comparação das duas versões da P.1812: banco de dados 2, abordagem 1, pol.vert. 65

**Tabela 17** – Comparação das duas versões da P.1812: banco de dados 2, abordagem 2, pol horiz. 66

**Tabela 18** – Comparação das duas versões da P.1812: banco de dados 2, abordagem 2, pol vert. 66

**Tabela 19** – Comparação das duas versões da P.1812: banco de dados 3, abordagem 1, pol. vert. 67

**Tabela 20** – Comparação das duas versões da P.1812: banco de dados 3, abordagem 2, pol. vert. 67

**Tabela 21** – Valores de **R** para o banco de dados 1 usando a abordagem 1 104

**Tabela 22** – Valores de **R** para o banco de dados 1 usando a abordagem 2 104

**Tabela 23** – Valores de **R** para o banco de dados 2 usando a abordagem 1 105

**Tabela 24** – Valores de **R** para o banco de dados 2 usando a abordagem 2 105

**Tabela 25** – Valores de **R** para o banco de dados 3 usando a abordagem 1 106

**Tabela 26** – Valores de **R** para o banco de dados 3 usando a abordagem 2 106

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---|---|
| 3GPP | *3rd Generation Partnership Project* |
| ANN | *Artificial Neural Network* |
| BS | *Base Station* |
| BT LE | *Bluetooth Low Energy* |
| COST | *European Cooperation in Science and Technology* |
| CR | *Coding Rate* |
| EIRP | *Effective Isotropic Radiated Power* |
| FSPL | *Free Space Path Loss* |
| GO | *Geometrical Optics* |
| GPS | *Global Positioning System* |
| HUCFF | Hospital Universitário Clementino Fraga Filho |
| I2O | *Indoor-to-Outdoor* |
| IoT | *Internet of Things* |
| ISM | *Industrial, Scientific and Medical* |
| ITU-R | *International Telecommunication Union - Radiocommunication* |
| LoRa | *Long Range* |
| LoRaWAN | *Long Rage Wide-Area-Network* |
| LoS | *Line-of-Sight* |
| LPWAN | *Low-Power Wide-Area-Network* |
| LTE | *Long Term Evolution* |
| M2M | *Machine-to-Machine* |
| MWM | *Multi-Wall Model* |
| NB-IoT | *Narrowband Internet of Things* |
| NFC | *Near Field Communication* |
| NLoS | *Non-Line-of-Sight* |
| O2I | *Outdoor-to-Indoor* |
| PL | *Path-Loss* |
| QoE | *Quality of Experience* |
| RSSI | *Received Signal Strength Indication* |
| Rx | *Receiver* |
| SaR | *Search and Rescue* |
| SF | *Spreading Factor* |

| | |
|---|---|
| SUI | *Stanford University Interim* |
| Tx | *Transmitter* |
| UFRJ | Universidade Federal do Rio de Janeiro |
| UHF | *Ultra High Frequency* |
| UMa | *Urban Macro* |
| UMi | *Urban Micro* |
| UTD | *Uniform Theory of Diffraction* |
| Wi-Fi | *Wireless Fidelity* |
| Wi-SUN | *Wireless-Sensor Utility Network* |
| WLAN | *Wireless Local Area Network* |

# 1. Introdução

No cenário tecnológico atual, se mantém o enfoque na evolução dos sistemas de comunicação, a fim de acompanhar a demanda crescente de cobertura e de serviços. Um dos aspectos decorrentes deste processo é a Internet das Coisas (IoT – *Internet of Things*), que, de acordo com Santos *et al.* (2016), constitui um conjunto vasto de tecnologias que permitem aos objetos do dia a dia se conectarem à Internet.

Cada técnica de IoT possui suas particularidades, bem como limitações e procura atender a determinadas necessidades do mercado de comunicações e serviços. Se for requerida uma alta taxa de transmissão de dados, podem ser utilizadas redes WLAN (*Wireless Local Area Network*) em curto alcance. No entanto, essa tecnologia também requer um alto consumo de energia, que por vezes não é desejável nos sistemas sem fio. Por outro lado, se o desejado for uma tecnologia que entregue altas taxas de transmissão com longo alcance, podem ser empregadas redes celulares. Novamente, esses sistemas sofrem com o alto consumo de energia. Redes que utilizam tecnologias como ZigBee, BT LE (*Bluetooth Low Energy*) ou NFC (*Near Field Communication*), são aquelas cujas características são opostas às das redes celulares, pois possuem baixa capacidade de alcance, com baixas taxas de transmissão e baixo consumo de energia (KEYSIGHT, 2020).

Por fim, há um quarto ramo de tecnologias que podem ser utilizadas para constituir sistemas IoT: as LPWAN (*Low Power Wide Area Networks*), que de acordo com o exposto por Raza, Kulkarni e Sooriyabandara (2017), ganham importante aplicabilidade em comunicação M2M (*Machine to Machine*). Elas, por sua vez, preenchem a lacuna que compõe uma abordagem que proporciona longo alcance, com baixa taxa de transmissão, mas também baixo consumo de energia (KEYSIGHT, 2020). A Figura 1 ilustra a disposição desses quatro grupos de tecnologias quanto à taxa de transmissão/consumo de energia e alcance do sinal.

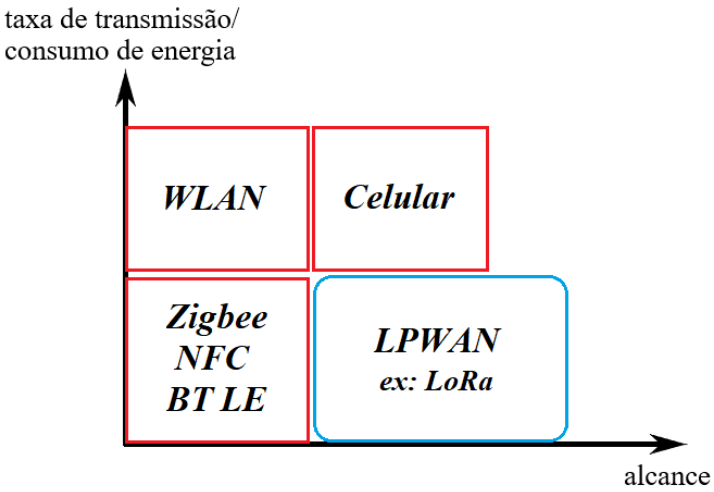



**Figura 1** – Comparação entre tecnologias IoT quanto à taxa de transmissão / consumo de energia e alcance do sinal (adaptado de KEYSIGHT, 2020)

Particularmente, as tecnologias LPWAN têm adquirido crescente relevância no mercado IoT, em cenários em que somente é exigida a transmissão de poucos dados entre os nós da rede, por uma longa distância (SINHA; WEI; HWANG, 2017). Empregam estratégias de baixo consumo de energia, que, por sua vez elevam o tempo de vida das baterias dos dispositivos pertencentes ao sistema. Também são atrativas, por conta do custo dos dispositivos relativamente baixo e da alta capacidade de cobertura (KEYSIGHT, 2020).

Dentre essas tecnologias, se destacam quatro principais: SigFox, LTE-M, LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*) e NB-IoT (*Narrowband IoT*) (SINHA; WEI; HWANG, 2017). A abordagem LPWAN se utiliza das bandas licenciadas e não-licenciadas, em diversas frequências do espectro e o tempo de vida da bateria dos dispositivos varia sensivelmente com o tipo de tecnologia empregada, dada a heterogeneidade desse ramo dos sistemas de comunicações sem fio. Com o objetivo de ilustrar essas diferenças inerentes, a Tabela 1 apresenta uma simples comparação entre essas quatro tecnologias LPWAN, quanto ao tempo de vida da bateria, à eficiência de potência, ao alcance e à imunidade à interferência.

**Tabela 1** – Comparação entre LoRaWAN, SigFox, NB-IoT e LTE-M (adaptado de SILVA *et al.*, 2017)

| | **LoRaWAN** | **SigFox** | **NB-IoT** | **LTE-M** |
|---|---|---|---|---|
| **Tempo de vida da bateria** | 8 a 10 anos | 7 a 8 anos | 7 a 8 anos | 1 a 2 anos |
| **Eficiência de potência** | Muito alta | Muito alta | Muito alta | Média |
| **Alcance** | 2 a 5km se urbano; 15km se suburbano; 45km se rural | 3 a 10km se urbano; 30 a 50km se rural | 1,5km se urbano; 20 a 40km se rural | 35km se 2G; 200km se 3G; 200km se 4G |
| **Imunidade à interferência** | Muito alta | Baixa | Baixa | Média |

Das quatro abordagens apresentadas na Tabela 1, a que proporciona maior tempo de vida da bateria dos dispositivos da rede, bem como melhor imunidade à interferência de sinal é a LoRaWAN. Por utilizar bandas não licenciadas, não há custo de licença de espectro para utilização, o que oferece uma grande vantagem em relação àquelas tecnologias que trabalham em bandas licenciadas. Adicionalmente, os custos de aquisição dos dispositivos podem ser consideravelmente baixos para redes LoRaWAN, como indicado por Sinha, Wei e Hwang (2017).

Por conta dessas características, a tecnologia LoRa se tornou altamente atrativa no mercado, em variadas áreas de atuação, como: cidades inteligentes, indústria ou monitoramento ambiental.

## 1.1 – Motivação

No contexto das comunicações sem fio, garantir a transmissão e o recebimento correto das informações é um desafio constante, por conta das características altamente dinâmicas do canal de propagação, bem como dos efeitos ambientais e de terreno. Trata-se não somente de uma adversidade no campo de *hardware*, no que tange às implementações que realizam operações de codificação, modulação do sinal e detecção e correção de erros, como também no campo do projeto de enlace, mais especificamente na predição de cobertura. Por se comunicarem por redes sem fio, as redes IoT, bem como os dispositivos que as compõem, também estão sujeitas a estes desafios.

Aqui, ressalta-se que as tecnologias M2M agem como parceiras do negócio nos campos corporativos e são verdadeiras atuantes no aprimoramento da segurança urbana e empresarial, o que confere destaque à IoT como um conjunto de soluções para problemas complexos que se

estendem nas mais diversas aplicações.

Por conta disso, é imperativo o estudo e análise de tais sistemas, com o objetivo de aprimorar a eficiência dessas redes. Um método para tal é o conhecimento extenso de suas limitações, como a região de transmissão efetiva ao redor do dispositivo transmissor, que define sua cobertura. Essas informações podem ser adquiridas por meio da determinação das perdas que o sinal sofre ao longo desse caminho do enlace.

O cálculo dessas perdas é feito de diversas formas, mas em geral obedece a um modelo de propagação, cuja escolha deve levar em consideração diversos aspectos do relevo do terreno, da região onde será instalada a rede, do clima e da tecnologia empregada.

Dentro do contexto da IoT, a LoRaWAN ganha particular enfoque, não somente no campo das aplicações, como também na área de pesquisa e desenvolvimento. A relevância crescente desta tecnologia, juntamente com a necessidade de se utilizar modelos de propagação apropriados para a cobertura de tais redes, motivam o estudo dessa abordagem LPWAN.

## 1.2 – Dificuldades na área

Redes LPWAN em banda não licenciada trazem consigo dificuldades, tais como:

(a) Aquelas inerentes à própria natureza do enlace de rádio. Uma delas é a característica estocástica do canal de propagação, uma vez que o seu comportamento é altamente dinâmico, variando no tempo e no espaço, e possuindo caráter probabilístico. Portanto, observam-se flutuações aleatórias nos níveis dos sinais de recepção, fator que poderá ocasionar até mesmo queda do enlace em condições extremas. A Figura 2 ilustra flutuações de sinal, dentre elas aquelas causadas pelo efeito do sombreamento (*Shadowing*) e devidas aos múltiplos caminhos que o sinal percorre no ambiente (*Multipath fading*).

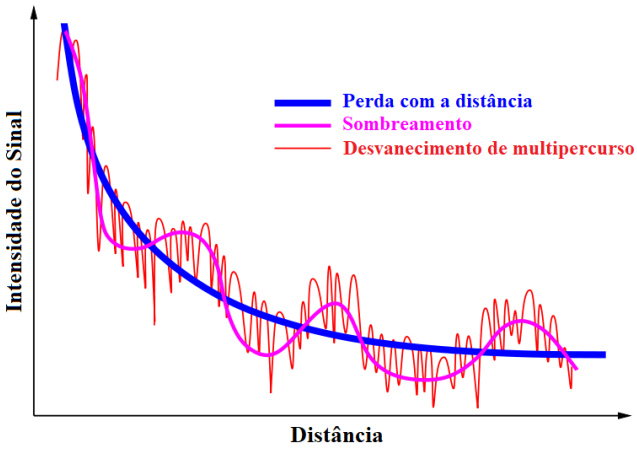



**Figura 2** – Variação do sinal de recepção com a distância, com componentes de Multipercurso, Sombreamento e Perda com a distância (LIU *et al.*, 2008)

(b) A grande variedade de cenários pode ser entendida como um obstáculo ao projeto de tais redes, já que, muitas vezes, para determinação das perdas de caminho, é necessária a caracterização do ambiente em que está inserida essa rede para o seu correto planejamento. Não é incomum que os modelos de propagação se utilizem de formulações específicas para cenários distintos; logo, uma grande variedade de aplicações de redes LPWAN pode gerar dificuldades na escolha do correto modelo para a situação de projeto. Persia, Carciofi e Faccioli (2017) citam 3 cenários distintos: *Indoor*, *Outdoor* e *Deep Indoor*. No entanto, como ocorre com outros sistemas de comunicação sem fio, possíveis variações podem ser utilizadas, como I2O (*Indoor to Outdoor*), e O2I (*Outdoor to Indoor*). Por fim, o enlace poderá ser LoS (*Line-of-Sight*) ou NLoS (*Non-Line-of-Sight*).

(c) Quanto à implementação, a utilização das bandas não licenciadas torna imprescindível a utilização de algum método de combate aos efeitos de interferência, uma vez que essa faixa do espectro é utilizada por diversos ramos, como medicina, pesquisa e indústria (ISM – *Industrial*, *Scientific and Medical*). Nesse aspecto, possuir mecanismos eficientes de mitigação desses efeitos torna-se um diferencial.

## 1.3 – Problemas em constante estudo e o problema de interesse

Uma preocupação constante em redes LPWAN é o seu comportamento diante de sinais interferentes, uma vez que podem ter efeitos prejudiciais na recepção. Dentre todas as tecnologias desse ramo, as mais críticas são as que utilizam as faixas ISM e, por isso, estudos foram feitos para

analisar a robustez dessas LPWAN em presença de interferência. Qadir (2020) estudou a confiabilidade de um sistema LoRa nesse quesito, e Aihara *et al.* (2020) desenvolveram um sistema de detecção de mudança no estado de interferência entre sistemas que utilizam mesma faixa do espectro, com o objetivo de otimizar a alocação de recursos em um cenário de coexistência entre LoRaWAN e Wi-SUN (*Wireless-Sensor Utility Network*).

Ademais, a necessidade por serviços eficientes de localização, que sirvam como alternativas ao GPS (*Global Positioning System*), se torna cada vez mais relevante, no contexto da IoT. Esse ramo de pesquisa possui diversas vertentes, no que tange à tecnologia empregada. No entanto, soluções baseadas em ZigBee, Bluetooth e Wi-Fi são limitadas em alcance (LAM; CHEUNG; LEE, 2019). Por conta disso, analisa-se a possibilidade de implementação de tais serviços por meio de redes LPWAN. Lam, Cheung e Lee (2019) propuseram uma solução baseada em LoRa para ambientes *Indoor* e *Outdoor*, e no último, obteve uma performance comparável à do GPS.

Por fim, dentre as possíveis áreas de atuação das LPWAN para serviços de localização, uma que se destaca é a SaR (*Search and Rescue*), pois tais tecnologias podem ser empregadas para localização de feridos em acidentes. Nesse âmbito, Bianco *et al.* (2020) desenvolveram um sistema eficiente de localização para operações SaR baseado em LoRa, propondo uma alternativa aos serviços já consagrados.

No que tange ao projeto de enlace de uma rede LPWAN, uma estratégia comumente utilizada é a adoção de modelos de propagação gerais, muitos dos quais já faziam a predição de perda de caminho de redes celulares. No entanto, algumas particularidades de redes IoT LPWAN podem causar uma menor aderência com relação a esses modelos, como ressaltado por Chall, Lahoud e Helou (2019), o que pode ter efeitos prejudiciais para a funcionalidade das redes depois de implementadas.

Tais preocupações geraram uma demanda pelo desenvolvimento de novos modelos para predição de cobertura de enlaces dessa natureza, bem como o ajuste de modelos de propagação já existentes para melhor se adequarem a determinadas abordagens LPWAN.

A demanda é vigente para diferentes vertentes IoT. No entanto, é possível delimitar uma tecnologia específica de interesse. Dentre as já apresentadas, que trabalham com o conceito *Low Power*, ganha destaque para análise a tecnologia LoRaWAN, não somente por conta das vantagens técnicas citadas anteriormente, em comparação com as outras estratégias LPWAN, como também por ser uma das tecnologias mais empregadas desse tipo, como indicado por Chall, Lahoud e Helou (2019), ganhando assim notoriedade para pesquisa. Por fim, o estudo do LoRaWAN na literatura é vasto, no que tange à análise de desempenho da abordagem, o que confere uma rica

fundamentação teórica ao estudo que aborde tal assunto.

Devido a tais fatores, percebe-se, neste problema em especial, uma possibilidade de relevante contribuição científica, motivo pelo qual foi escolhido como assunto de interesse neste trabalho.

## 1.4 – Estado da Arte

A problemática gerada pela demanda por estratégias de predição mais precisas, tendo em vista as redes LoRaWAN, ocasionou uma série de estudos, visando este fim. Abaixo, são descritos os considerados mais relevantes, resultados de uma pesquisa sistemática da literatura (RSL) em uma janela temporal de 2017-2021, período determinado como de maior concentração de artigos sobre o assunto "LoRaWAN".

Stusek *et al.* (2020) se destaca por apresentar uma seletiva comparação entre modelos de propagação potenciais para o uso em redes LoRaWAN, NB-IoT e SigFox, usando como base os dados de campo obtidos em campanhas de medição nas cidades de Brno e Ostrava (República Checa). Para os resultados obtidos em Brno, foram geradas curvas ajustadas por meio do método da regressão não-linear. Em seguida, os modelos de propagação selecionados foram comparados com as curvas de regressão, para determinação de quais eram os mais precisos. Por fim, os modelos foram modificados cuidadosamente, com o objetivo de torná-los mais exatos, e testados quanto ao nível de predição, com os dados de Ostrava. No entanto, o comportamento dos modelos modificados em LoRaWAN apresentaram resultados negativos com relação à generalidade deles, uma vez que houve um aumento considerável do desvio padrão para todos os 5 modelos de propagação, quando eles foram testados para o cenário de Ostrava. Isso demonstra um elevado erro na predição da perda de caminho, para outro cenário que não o de Brno.

Klaina *et al.* (2020), por sua vez, trabalharam com uma abordagem determinística, implementando um modelo de cenário urbano 3D, baseado na Teoria Uniforme da Difração (UTD) e na Óptica Geométrica (GO). O método permite a obtenção de um panorama completo do comportamento eletromagnético no ambiente de operação, possibilitando não somente a obtenção da perda de caminho, mas também da distribuição espacial da potência estimada. Por outro lado, foi detectada uma alta imprecisão devida a efeitos de divergência no modelo, em determinadas condições de NLoS e a complexidade do modelo dificulta sua implementação.

Chall, Lahoud e Helou (2019) fizeram uma modificação do modelo *Log-Distance*, computando o efeito da altura da antena dos dispositivos LoRa. A formulação é simples e permite

sua rápida utilização em projetos de cálculo de enlace. O artigo também comparou o modelo desenvolvido com outros modelos comumente utilizados, em cenários urbanos e rurais: Okumura-Hata, Cost 231-Hata e 3GPP-UMa. Porém, a perda adicional devida à altura da antena do *End-Device* é obtida a partir do método de regressão linear, usando dados de medição na região do Líbano, não sendo demonstrados testes de validação desses valores, para outros cenários semelhantes. Nesse aspecto, o modelo segue pendente de comprovação de generalização.

Marquez *et al*. (2019) utilizaram o método da equação logarítmica do modelo *Log-Distance* e obtiveram, a partir dos dados da campanha de medição, uma expressão própria para o caso estudado. Analisaram o modelo proposto por Chall, Lahoud e Helou (2019) e indicaram que, em casos LoS e com altura da antena dos dispositivos LoRa maior que 2m, como é o caso da campanha de medição, a expressão desenvolvida pelos outros autores se reduz ao formato da expressão obtida nesse trabalho. No entanto, não há qualquer evidência que demonstre a generalidade do modelo.

O trabalho desenvolvido por Dieng, Pham e Thiare (2020) chama a atenção por conta de sua metodologia de pesquisa, que segue procedimentos bem definidos para a obtenção do resultado desejado: a) identificar os modelos de propagação que podem ser aplicados a redes LoRa, baseados nos critérios “frequência”, “distância”, “altura do *gateway*” e “altura do dispositivo final LoRa”; b) comparar os modelos de propagação selecionados para encontrar aquele que melhor estima a perda de caminho; c) tentar otimizar o modelo escolhido; e d) testar o modelo otimizado em ambientes diferentes. Os autores concluíram que o modelo de Hata foi o mais preciso, para as medições utilizadas. O modelo foi ajustado usando o método dos mínimos quadrados, gerando uma formulação mais simples e que foi validada com sucesso para outro cenário de propagação, mas somente por ser mais preciso que os demais modelos utilizados. No entanto, como mencionado pelos próprios autores, há uma imprecisão considerável entre os valores obtidos na campanha de medição (etapa ‘d’) e os valores da perda de caminho prevista pelo modelo proposto.

Por último, Hosseinzadeh *et al.* (2017) analisaram uma rede LoRaWAN em cenário O2I (*Outdoor to Indoor*) e propuseram modificar o modelo clássico COST-231 para ambiente *Indoor* (MWM – *Multi-Wall Model*), adicionando a ele um expoente de perda de caminho para ajudar a contabilizar efeitos *Outdoor*. Ademais, é incluída uma camada de rede neural artificial (ANN), o que provê um sistema de treinamento do modelo e aumenta sua exatidão. Infelizmente, o artigo não apresenta detalhes da implementação da rede neural ou da plataforma utilizada para sua execução. Além disso, as medições foram feitas na faixa de 867,1MHz; dessa forma não há confirmação de que a modificação do modelo MWM seja válida para outras frequências utilizadas por dispositivos LoRa.

Com base no estudo dessas referências, foram identificadas lacunas de pesquisa, apontadas na Tabela 2. Ao analisá-la, percebe-se claramente que são 2 as lacunas que não são preenchidas por nenhuma das bibliografias disponíveis: não foi obtido nenhum estudo cujo modelo permita determinar, de forma discriminada, perdas devidas a efeitos do entorno dos terminais e difração para cada cenário empregado, simultaneamente, e não foram encontrados modelos para LoRaWAN que fizeram seus testes utilizando a faixa ISM de 915MHz, apropriada para uso desse tipo de tecnologia, seguindo as recomendações e restrições de alocação de espectro da Anatel (BRASIL, 2019).

**Tabela 2** – Possíveis lacunas dos trabalhos obtidos

| | **Possíveis Lacunas** | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Artigos Incluídos** | **Faz comparação com outros modelos possíveis para LoRaWAN** | **Modelo que permite determinar efeitos do entorno dos terminais e efeitos de difração para cada cenário empregado, simultaneamente** | **Faz análise para cenários urbanos densos** | **É testado para 915MHz (pertence ao ISM do Brasil)** |
| Accuracy Assessment and Cross-Validation of LPWAN Propagation Models in Urban Scenarios | X | | X | |
| Aggregator to Electric Vehicle LoRaWAN Based Communication Analysis in Vehicle-to-Grid Systems in Smart Cities | | | X | |
| LoRaWAN Network Radio Propagation Models and Performance Evaluation in Various Environments in Lebanon | X | | X | |
| On the Use of LoRaWAN in Smart Cities A Study With Blocking Interference | | | | |
| Comparing and Adapting Propagation Models for LoRa Networks | X | | | |
| A neural network propagation model for LoRaWAN and critical analysis with Real-World Measurements | X | | | |

Ambas as lacunas se mostram promissoras, a primeira por compor fenômenos conhecidos que podem ser modelados e a segunda por não possuir nenhuma limitação quanto à sua implementação. Por esses motivos, essas lacunas foram escolhidas para, juntamente, pautarem a presente pesquisa.

## 1.5 – Limitação da literatura

O Estado da Arte indica uma lacuna quanto à carência de estudos de modelagem de redes LoRaWAN que determinam efeitos conjuntos de perda por difração e por obstáculos nos arredores dos terminais de transmissão e/ou de recepção (perdas de *clutter*), de forma discriminada. A obtenção desses valores para cada cenário é essencial, tanto para regiões abertas quanto para ambientes densos, como regiões urbanas.

Modelos de propagação empíricos que não discriminam efeitos de difração e perdas devidas ao entorno dos terminais sofrem com inexatidão, uma vez que, mesmo tendo computado tais efeitos nos dados de medição que permitiram seu desenvolvimento, não levam em consideração a modificação dessas condições quando o cenário de aplicação é outro. Já a formulação particular de tais efeitos permite obter os valores próprios para cada cenário, o que não foi observado na literatura obtida nesta RSL.

Ademais, não foram detectados modelos de propagação, no Estado da Arte, que se utilizaram da faixa de 915MHz para LoRaWAN. Essa segunda lacuna traz à tona uma necessidade nacional quanto à pesquisa do LoRa para serviços no país.

## 1.6 – Hipótese

O trabalho foi estabelecido, tendo como base a hipótese de que, se for empregado o modelo de propagação ITU-R P.1812 na faixa de 915MHz, em redes LoRaWAN, então será possível atingir resultados de predição de perda de caminho precisos, com a ajuda da correta escolha do tratamento dos dados de entrada de efeito de *clutter* nos arredores dos terminais e ao longo do percurso.

O modelo ITU-R P.1812 é um método relativamente recente, desenvolvido para predição de perda de caminho em uma ampla gama de frequências, englobando a faixa de 915MHz utilizada no Brasil para dispositivos LoRa. Outros de seus requisitos são compatíveis com redes LoRaWAN, o que o torna uma ferramenta potencial para modelar o enlace. Ademais, esse método permite calcular a perda devida à difração no ambiente, além dos efeitos dos arredores dos terminais, de forma discriminada, preenchendo a lacuna dos modelos da literatura. No entanto, o modelo depende de uma grande quantidade de dados de entrada, sendo altamente sensível ao modo como

esses dados são tratados. Dessa forma, mínimas modificações nesses dados, ou interpretações errôneas do ambiente analisado, podem ser responsáveis por grandes discrepâncias nos valores. Similarmente, considerando tal aspecto, parece razoável conjecturar que um determinado tratamento dos dados de entrada possa ser o responsável pela aproximação entre os valores previstos pelo modelo e os medidos. Por isso, com o objetivo de tornar o modelo eficiente para redes LoRaWAN, é interessante considerar a possibilidade de investigar um método uniforme padrão do tratamento dos dados, que seja simples e que proporcione resultados mais precisos.

## 1.7 – Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é demonstrar que é verdadeira a hipótese de que o uso do modelo de propagação ITU-R P.1812 na faixa de 915MHz, para redes LoRaWAN, leva a predições precisas de perda de caminho, uma vez empregado o correto tratamento de dados de *clutter*. Para cumpri-lo, foram realizadas análises do modelo em cenários típicos de uso de redes LoRaWAN utilizando dados de medição, em comparação crítica com outro modelo compatível com LoRaWAN e foi realizada uma verificação crítica de métodos de análise dos dados para obtenção dos melhores resultados possíveis. Juntamente a isso, ressaltam-se também 2 objetivos específicos, a saber:

(a) Contribuir para o desenvolvimento da pesquisa na área de predição de cobertura em redes LoRaWAN; e
(b) Confrontar diferentes modelos de propagação, obtendo assim dados de comparação que poderão ser úteis para pesquisas futuras, bem como para a melhor escolha do modelo a ser empregado, no quesito de projetos de enlace.

## 1.8 – Organização

Após a Introdução, esta dissertação é estruturada da seguinte forma: o Capítulo 2, “Modelos de Propagação”, apresenta o procedimento de seleção adotado para obtenção de modelos mais compatíveis com a tecnologia LoRaWAN, tendo em vista uma série de parâmetros ligados às suas características, e descreve os modelos resultantes do método, de forma breve.

O Capítulo 3, “Metodologia”, diz respeito à estratégia utilizada para abordar o problema

em questão, enumerando o que foi realizado e as ferramentas adotadas para tal. Nesse capítulo, são descritos os bancos de dados, as técnicas de extração dos valores de perda de caminho, a estrutura dos algoritmos Octave desenvolvidos para a pesquisa e as abordagens de tratamento de dados.

O Capítulo 4, “Análise e resultados”, apresenta e analisa os testes realizados e o que foi obtido de cada um deles, tendo em vista a hipótese supracitada.

O Capítulo 5 “Considerações Finais” conclui o trabalho, descrevendo de forma breve o que foi realizado, apresentando as contribuições e estabelecendo ideias para trabalhos futuros.

Por fim, o Apêndice I compila os principais algoritmos, que ilustram a lógica implementada para os testes do Capítulo 4 e o Apêndice II apresenta os dados de *clutter* utilizados.

# 2. Modelos de Propagação

Com o objetivo de elucidar o contexto de análise deste trabalho, de modelos de propagação, o capítulo é composto por 3 seções, a saber: a seção 2.1, "Conceitos Gerais", enuncia as informações fundamentais acerca de modelos de propagação, incluindo sua classificação amplamente aceita. A seção 2.2, "Escolha de modelos de propagação apropriados", descreve o procedimento utilizado de escolha de modelos de propagação apropriados para redes LoRaWAN, que servem como base da elaboração do *script* Octave, bem como da comparação crítica entre técnicas distintas de predição. A seção 2.3, "Descrição dos modelos selecionados", finaliza o capítulo ao apresentar, de forma breve, os dois modelos de propagação resultantes do método da seção 2.2.

## 2.1 – Conceitos Gerais

Um modelo de propagação representa matematicamente as características de radiofrequência em um cenário de transmissão/recepção sem fio (ERUNKULU *et al.*, 2020). Neste sentido, no que tange ao projeto de enlace, a escolha e o uso correto de um modelo de propagação são essenciais para o seu correto funcionamento. Por outro lado, o emprego de um modelo que não condiz com o cenário em que o enlace deverá funcionar, poderá prejudicar a cobertura do sinal.

Uma vez que a modelagem de enlace se caracteriza como fator determinante na garantia da QoE (Qualidade de Experiência) do usuário, a escolha do modelo de propagação afeta diretamente o cliente, uma vez que é ele que embasa o projeto do sistema de comunicação.

Os modelos de propagação se dividem em:

(a) **Teóricos (ou determinísticos)**: Modelos que utilizam formulação da teoria eletromagnética, podendo ser aplicados sem maiores restrições para uma grande variedade de cenários. Em geral, conferem maior dificuldade de implementação (BARIZON, 2004).

(b) **Empíricos**: Estes modelos se baseiam em campanhas de medição e matematizam os resultados ao determinar curvas que melhor representam o comportamento da atenuação pela distância. Contabilizam todos os fatores do ambiente que acabam por afetar a propagação do sinal. No entanto, necessitam de validação em outras circunstâncias, com o objetivo de tornar o modelo mais abrangente (PEREIRA, 2007).

(c) **Semi-empíricos**: Possuem características dos modelos empíricos e teóricos. Podem ser aferidos por meio das medições do ambiente de interesse, o que permite minimizar o erro de estimativa do modelo de propagação utilizado (PEREIRA, 2007).

## 2.2 – Escolha de modelos de propagação apropriados

Em primeiro lugar, o estudo focou na escolha de modelos de propagação adequados para predição com redes LoRaWAN. O método utilizado para a escolha dos modelos é baseado naquele efetuado por Dieng, Pham e Thiare (2020), que considera: (a) a altura do dispositivo LoRa, (b) a frequência utilizada, (c) a distância entre transmissor (Tx) e receptor (Rx), e (d) a altura do *Gateway*.

De acordo com Liya e Arjun (2020), as faixas utilizadas pelas redes LoRaWAN são de 433MHz, 463MHz, 868MHz e 915MHz, dependendo da região onde o sistema estará localizado. Ademais, Sinha, Wei e Hwang (2017), sugerem um alcance de 15km, entre Tx e Rx. Os valores típicos, associados às alturas dos dispositivos são, por sua vez, fornecidos por Dieng, Pham e Thiare (2020). De acordo com eles, a altura do *Gateway* costuma ser acima dos 10m. No entanto, também é sugerido que há um número significativo de aplicações LoRa que trabalham abaixo dos 10m de altura. Por fim, a altura típica dos dispositivos LoRa está na faixa entre 1m e 3m.

O cenário de testes escolhido para este trabalho foi o *Outdoor to Outdoor*, em que ambos os terminais estão localizados em ambiente externo. Os modelos selecionados devem atender a esses requisitos, de preferência sendo válidos para todas as frequências apresentadas, com ênfase para a portadora de 915MHz, utilizada no Brasil. A Tabela 3 apresenta uma breve comparação entre diferentes modelos de propagação, quanto aos quatro parâmetros utilizados na seleção. Os pontos de atenção são marcados em negrito.

**Tabela 3** – Comparação entre modelos de propagação

| **Nome do modelo** | **Frequência (MHz)** | **Distância entre Tx e Rx (km)** | **Altura do *Gateway* (m)** | **Altura do *End Device* (m)** |
|---|---|---|---|---|
| Okumura-Hata | 150 - 1500 | 1 - 20 | **30 - 200** | 1 - 10 |
| COST-231-Walfisch Ikegami NLoS | **800 - 2000** | **0.02 - 5** | 4 - 50 | 1 - 3 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| COST-231-Walfisch-Ikegami LoS | **800 - 2000** | ≥ 0.02 | - | - |
| SUI | **≥ 2000** | **0.1 - 8** | **10 - 80** | **2 - 10** |
| 3GPP 38901 UMi LoS | **500 - 100000** | **0.01 - 5** | **10** | **1.5 - 22.5** |
| *Site-General* ITU-R P.1411-11 LoS | **800 - 82000** | **0.005 - 0.66** | - | - |
| *Site-Specific* ITU-R P.1411-11 *over rooftops/urban area* | **800 - 26000** | **0.02 - 5** | 4 - 55 | 1 - 3 |
| Egli | 40 - 1000 | < 60 | - | - |
| ITU-R P.1812 | 30 – 3000 (P.1812-5)<br>30 – 6000 (P.1812-6) | 0.25 - 3000 | 1 - 3000 | 1 - 3000 |

Como pode-se ver na Tabela 3, o modelo Okumura-Hata, descrito por Hata (1980), atende de forma satisfatória aos requisitos apresentados, no que diz respeito à frequência de operação, distância entre Tx e Rx e altura do *End Device*. Um fator, no entanto, deve ser considerado, quando se analisa tal modelo e sua possível versatilidade com redes LoRaWAN: a definição de altura do *Gateway* utilizada por Okumura-Hata, cujo limite é apresentado na tabela, é pautada no conceito de altura efetiva, e leva em consideração a altura do terreno e a altura real do terminal, para determinar seu valor. Sendo assim, a aplicabilidade do modelo fica sujeita ao ambiente no qual está inserida a rede a ser analisada, o que prejudica seu desempenho, na seleção, no que diz respeito à generalidade do modelo. Por conta disso, foi descartado.

Por outro lado, o modelo COST-231-Walfisch Ikegami NLoS, apresentado por *European Comission* (1999), apresenta duas principais dificuldades, quanto à sua aplicabilidade em redes LoRaWAN. Primeiramente, a faixa de frequências apropriada para uso desse modelo não inclui duas das quatro frequências de portadora citadas por Liya e Arjun (2020), embora englobe a faixa de 915MHz utilizada no Brasil, característica que é replicada para a sua versão LoS. Ademais, é apontado que o modelo trabalha até uma distância limite, entre terminais, de 5km, colocando em dúvida a precisão de tal método para a extensa faixa 5 – 15km.

O modelo SUI de Erceg *et al*. (2001), por sua vez, apresenta problemas de adequação com relação a todos os parâmetros considerados: (a) trabalha somente para uma faixa de frequência acima de todas as utilizadas pelos sistemas LoRa, (b) possui um limite de distância entre terminais muito inferior a 15km, (c) não inclui altura de *Gateway* abaixo de 10m, e (d) não inclui alturas de *End Device* na faixa 1 – 2m.

De forma semelhante, o modelo 3GPP 38901 UMi LoS também apresenta desafios, no que tange aos quatro parâmetros: (a) não engloba duas das quatro faixas de frequência utilizadas por LoRa (433MHz e 463MHz), (b) possui um limite de distância entre terminais muito inferior a 15km, (c) é aparentemente válido, somente para a altura de *Gateway* de 10m, excluindo todas as outras possíveis, e (d) não trabalha na faixa 1 – 1,5m de altura do *End Device* (3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT, 2022).

Por sua vez, o modelo P.1411-11 LoS da ITU-R (2021), além de não ser válido para algumas das frequências dos sistemas LoRa, sofre na seleção, no que diz respeito à distância entre Tx e Rx, uma vez que trabalha com uma faixa de curtas distâncias, incongruente com as grandes distâncias que redes LoRaWAN podem alcançar. Outro modelo da mesma especificação é o P.1411-11 *over rooftops/urban área*, que novamente, é limitado em distância entre terminais e pelas frequências empregadas.

O modelo de Egli (1957) não determina limites para as alturas de terminais, como é evidente no trabalho de Delisle *et al.* (1985). Portanto, é isento da análise quanto a esses parâmetros. Adicionalmente, é indicado por Ajose e Imoize (2013), que tal método é válido para distâncias abaixo dos 60km, entre os terminais, e em uma faixa espectral de 40 – 1000MHz. Tais características atendem aos requisitos supracitados.

Semelhantemente, tanto a versão ITU-R P.1812-5 (2019) quanto a versão ITU-R P.1812-6 (2022), ilustradas na Tabela 3, apresentam características altamente favoráveis ao seu emprego em sistemas LoRa, no que tange aos parâmetros avaliados: (a) é adequado a todas as frequências de portadoras empregadas, (b) abrange distâncias muito inferiores a 15km, e muito superiores, (c) trabalha com ampla faixa de alturas de *Gateway*, incluindo as regiões abaixo e acima de 10m, e (d) abrange toda a faixa de alturas típicas do *End Device*. Essas características corroboram as informações apresentadas anteriormente sobre o modelo, no que tange ao seu grau de compatibilidade com essa tecnologia LPWAN.

Por conta desses fatores, os modelos ITU-R P.1812 e Egli são os mais apropriados, dentre todos os avaliados, para predição com tecnologia LoRaWAN.

Adicionalmente, cabe mencionar que, para esta dissertação, foi empregado o modelo de espaço livre, estruturado por Friis (1946), como um referencial de limiar otimista do desempenho

dos dois modelos selecionados, por considerar apenas circunstâncias sem perdas adicionais ao longo da transmissão.

## 2.3 – Descrição dos modelos selecionados

### 2.3.1 – Modelo de Egli

O método desenvolvido por Egli (1957) surgiu da necessidade por modelos mais precisos, em circunstâncias de enlaces com irregularidade do terreno, acima de 40MHz, cenários onde as técnicas tradicionais da época tornavam-se ineficazes. É baseado em dados de medição, nas faixas V/UHF, obtidos por organizações comerciais em diversas partes dos Estados Unidos da América, dentre as quais: Nashville, Pittsburgh, São Francisco, Cleveland, Kansas City, Washington D.C. e Nova York.

O estudo trabalha com uma distribuição log-normal das alturas do terreno do enlace, o que possibilita, em última instância, a determinação da perda de caminho média, devida ao terreno, como descrito por Seybold (2005). Inicia-se com a formulação da intensidade de campo elétrico, teórico, para cenário *Plane-Earth*, indicando suas limitações, em questão do ambiente de aplicação, e ajustando-a com base em dados advindos das medições.

O modelo de Egli costuma ser empregado para cenários com terreno irregular e não leva em consideração efeitos da vegetação (SEYBOLD, 2005). Originalmente, o método foi apresentado na forma de nomogramas (EGLI, 1957). De acordo com Delisle *et al.* (1985), o modelo de propagação de Egli pode ser expresso pela Equação (1):

$$L_{egli} = 20\log_{10} f_c + 40\log_{10} d - 20\log_{10} h_b + \begin{cases} 76{,}3 - 10\log_{10} h_m & h_m \leq 10 \\ 85{,}9 - 20\log_{10} h_m & h_m > 10 \end{cases} \text{(dB)} \qquad (1)$$

em que $f_c$ representa a frequência em MHz, $h_b$ e $h_m$ são as alturas da estação base e do *End Device*, respectivamente, em metros (m), e $d$ representa a distância, em quilômetros (km), entre transmissor e receptor.

Adicionalmente, ressalta-se que o modelo de Egli não computa perdas devidas à difração ocasionada por propagação em terreno irregular ou efeitos devidos a edifícios (DELISLE *et al.*, 1985). Por outro lado, este método se destaca por sua facilidade de implementação, como ressaltado ainda por Seybold (2005), particularmente para uma primeira análise de predição.

### 2.3.2 – Modelo ITU-R P.1812

A recomendação P.1812 da ITU-R descreve um modelo de propagação capaz de prever perda de caminho (*Path Loss*) para enlaces, inicialmente, na faixa de 30MHz a 3000MHz, tendo sido expandido para até 6GHz na atualização mais recente (ITU-R, 2022). Pode ser utilizado para predição de serviços de radiocomunicação terrestres com percursos de 250 metros até 3000 quilômetros de distância, com limitação de altura dos terminais de até 3 quilômetros acima do nível do solo, não podendo ser utilizado para enlaces espaço-Terra ou ar-solo (ITU-R, 2019).

É sugerido que tal método possa ser aplicado para prever áreas de serviço para sistemas rádio e disponibilidade, para um determinado nível de sinal, além de reduções dessa área de serviço e disponibilidade devidas a sinais interferentes. Sua formulação é simétrica, ou seja, é indiferente com relação a qual terminal é o transmissor (Tx) e qual é o receptor (Rx). Esse modelo se destaca por possibilitar a consideração de uma série de aspectos do canal de propagação, tais como: alturas do terreno ao longo do percurso do enlace, difração, espalhamento troposférico, fenômeno de *ducting* e reflexão por camadas/refração, perda por penetração em edifícios e efeito de *clutter* nos terminais (ITU-R, 2019).

O modelo adota, como dados de entrada, a frequência de utilização, a porcentagem de tempo em que o nível do sinal calculado é excedido (requisito de projeto), a porcentagem de localidades em que o nível do sinal é excedido, as latitudes e longitudes do transmissor e do receptor, as alturas das antenas de recepção e de transmissão acima do nível do solo, o tipo de polarização, a largura da rua e os vetores que descrevem o perfil de terreno Tx-Rx, a zona radio-climática e o *clutter* representativo para cada ponto de amostragem do percurso (*profile points*). A altura representativa de *clutter* é uma informação estatística, associada à cobertura do solo na região do ponto considerado, variando de acordo com as características do ambiente (urbano, com árvores, floresta, aberto, rural, corpos d'água, urbano denso) (ITU-R, 2019).

Em suma, trata-se de um método baseado em dados obtidos a partir de informação do terreno a ser considerado, entre Tx e Rx. Com base no terreno, é construída uma série de vetores, sendo os principais, tendo como referência a ITU-R P.1812-5: o vetor distância Tx-Rx $\mathbf{d} = [d_1, d_2, \dots, d_n]$, o vetor altura do perfil de terreno $\mathbf{h} = [h_1, h_2, \dots, h_n]$, e o vetor altura de *clutter* representativa $\mathbf{R} = [R_1, R_2, \dots, R_n]$, em que *n* representa o número de pontos do perfil de terreno que foram considerados (ITU-R, 2019). A única limitação definida pela ITU-R (2019) foi $n \geq 3$, associada a, no mínimo, três pontos de perfil, sendo dois deles referentes às localizações dos terminais.

O modelo ITU-R P.1812 utiliza as informações advindas do vetor **R** para determinar uma série de componentes de perda ao longo de sua formulação, a depender da versão do modelo adotada, tais como: a perda por difração de Bullington e as perdas adicionais devidas aos arredores nos terminais. A quantidade de dados que esse vetor possui dependerá da campanha de medição executada, da necessidade e da criticidade por valores tão precisos quanto possível, uma vez que corresponde ao grau de detalhamento dos vetores **d** e **h**.

Cabe ressaltar, ainda, que a ITU-R P.1812 traz um modelo *path-specific* capaz de realizar predições ponto-área, a partir de uma série de predições ponto-ponto, distribuídas uniformemente na área de serviço V/UHF. Tais procedimentos estão intrinsecamente correlacionados com a capacidade, por parte do projetista, de dispor de dados detalhados de perfil de terreno, para o ambiente no qual será realizada a predição (ITU-R, 2019).

Tendo como referência a ITU-R P.1812-5, a perda de caminho não excedida para $p$% do tempo e $p_L$% das localidades, denominada $L_b$ (dB), é determinada por meio da Equação (2), descrita em ITU-R (2019):

$$L_b = max\left[L_{b0p}, L_{bc} + L_{loc} - I\left(\frac{p_L}{100}\right)\sigma_{loc}\right] \text{ (dB)} \tag{2}$$

em que $L_{b0p}$ representa a perda básica não excedida para $p$% do tempo e 50% das localidades devido à propagação LoS, $L_{bc}$ é a perda básica não excedida para $p$% do tempo e 50% das localidades considerando as perdas de *clutter* nos terminais, $L_{loc}$ representa a perda de localidade média, $I(x)$ é a inversa da função de distribuição normal cumulativa complementar, e $\sigma_{loc}$ é o desvio padrão combinado, devido à variabilidade da localização e perda por penetração em edifícios, eventualmente.

Para efeitos de implementação, a última componente da expressão foi suprimida e $L_{loc}$ foi tido como nulo, característico de ambiente *Outdoor* conforme ITU-R (2019), restando apenas as duas primeiras componentes: $L_{b0p}$, proveniente do cálculo da perda de espaço livre, juntamente com correções, e $L_{bc}$, esta última determinada pela Equação (3), de acordo com ITU-R (2019):

$$L_{bc} = L_{bu} + A_{ht} + A_{hr} \text{ (dB)} \tag{3}$$

em que $L_{bu}$ representa a perda de caminho básica não excedida por $p$% do tempo e 50% das localidades na altura representativa de *clutter* (ou acima), $A_{ht}$ é a perda adicional devida aos arredores do terminal Tx, e $A_{hr}$ é a perda adicional devida aos arredores do terminal Rx.

A componente $L_{bu}$ computa os efeitos de espalhamento troposférico, difração e fenômenos

de *ducting*/*layer-reflection*. Já o fenômeno de *clutter* nos terminais é formulado de forma independente, com equacionamento idêntico para determinação dos valores de $A_{ht}$ e $A_{hr}$, a depender do caso, conforme a Equação (4), adaptada de ITU-R (2019):

$$A_h = \begin{cases} 0 & se\ h \geq R \\ J(v) - 6{,}03 & se\ h < R\ e\ Ct = 3,4\ ou\ 5 \\ -K_{h2} log(h/R) & se\ h < R\ e\ Ct = 1\ ou\ 2 \end{cases} \text{ (dB)} \quad (4)$$

em que $A_h$ é $A_{ht}$ ou $A_{hr}$, $J(v)$ é a expressão aproximada da perda de difração por um obstáculo do tipo gume de faca para valores de $v$ maiores que –0,78, $K_{h2}$ é um fator dependente da frequência, e $Ct$ representa o tipo de *clutter*, podendo assumir valores de 1 a 5. Valores de $Ct \leq 2$ estão associados a regiões abertas, enquanto valores de $Ct \geq 3$ representam regiões urbanas e/ou arborizadas.

Por conta de seu elevado detalhamento, no que tange à descrição dos efeitos devidos ao ambiente no qual está imerso o enlace de propagação, apresenta-se como uma técnica promissora de alta precisão para predição de cobertura, particularmente em redes LoRaWAN, que frequentemente devem ser empregadas em ambientes de alta complexidade eletromagnética.

Por se tratar de uma recomendação ITU-R, o modelo sofre constante modificação ao longo do tempo, por meio do lançamento de novas versões. As duas mais recentes, P.1812-5 e P.1812-6, abordadas neste trabalho e citadas na Tabela 3, são singulares por conta de suas diferenças, as principais elencadas a seguir: (a) modificação do vetor de alturas representativas de *clutter*; (b) exclusão, na 6ª versão, das perdas adicionais devidas aos arredores dos terminais; e (c) formulação distinta da distância entre Tx e Rx, para perda do espaço livre.

# 3. Metodologia de Trabalho

Este capítulo é dividido da seguinte forma: a seção 3.1, “Descrição geral da metodologia”, expõe de que forma foi explorado o problema de pesquisa, levando-se em consideração a hipótese postulada. Nela, são descritos o método de análise e a abordagem para obtenção de dados resultantes de campanhas de medição com sistemas LoRa, bem como as ferramentas computacionais utilizadas para realização dos testes. Por outro lado, a seção 3.2, “Descrição das campanhas de medição”, apresenta as principais características e peculiaridades de cada campanha selecionada. Tais cenários de teste são utilizados, nesta dissertação, como bases de dados de entrada para o *script* Octave, pautando as análises subsequentes. Nessa seção, também são apresentados os métodos de extração dos dados para alimentar o código Octave. A seção 3.3, “Algoritmo de análise de dados”, apresenta aspectos relevantes acerca do código de testes elaborado pelo autor. Por fim, a seção 3.4, “Abordagens de tratamento de dados de entrada de *clutter*”, finaliza este capítulo, descrevendo os dois métodos comparados nesta dissertação, no que tange ao tratamento das informações de altura representativa de *clutter*, para o modelo de propagação ITU-R P.1812.

## 3.1 – Descrição geral da metodologia

Esta dissertação buscou explorar uma alternativa ao uso de modelos de propagação gerais em predição de redes LoRaWAN. Como ressaltado anteriormente, essa adoção está sujeita a efeitos prejudiciais, resultantes da incompatibilidade desses modelos com as particularidades dos sistemas LoRaWAN, o que gerou a necessidade de desenvolvimento de novos modelos próprios para essa tecnologia, ou mesmo o ajuste ou modificação de um modelo pré-existente.

Seu desenvolvimento e progressão pautou-se na hipótese enunciada do ajuste de um modelo razoavelmente compatível com essa solução LPWAN, o modelo ITU-R P.1812. Sua escolha como item principal da hipótese se deve a dois fatores: (a) o resultado favorável do método de seleção de modelos de propagação apropriados, descrito no capítulo 2; e (b) seu atendimento simultâneo às duas lacunas encontradas na literatura. Neste aspecto, vale ressaltar a escolha do modelo de Egli como método auxiliar na análise, particularmente para obtenção de dados comparativos entre modelos compatíveis para LoRaWAN em cenários distintos. Diferentemente do ITU-R P.1812, o modelo de Egli não atende às duas lacunas da literatura simultaneamente, fator que contribuiu para sua utilização apenas como modelo de comparação.

Para estudar a hipótese, optou-se pela análise comparativa de dados estatísticos de média aritmética e desvio-padrão, advindos de conjuntos de perda de caminho (*Path Loss – PL*) médios para enlaces testados em campanhas de medição. Essas informações foram provenientes de três bancos de dados disponíveis na literatura, associados a diferentes cenários do ambiente. As ferramentas computacionais utilizadas foram o *software* Octave, para simulação dos dados, e o *software* Google Earth, para obtenção de informações a respeito de perfil de terreno entre os terminais de cada enlace.

O ajuste testado para o modelo de propagação P.1812 está relacionado com o modo como são tratados os dados de entrada de altura representativa de *clutter*. Neste trabalho, são apresentadas duas abordagens para tratamento dessas informações, uma mais complexa e outra simplificada. Para cada cenário, são realizados testes para ambas as abordagens, de forma a estabelecer comparação entre seus dados estatísticos, apresentando conclusões que indiquem o desempenho de tais técnicas.

Ressalta-se que o modelo ITU-R P.1812-5 foi adotado como versão padrão na realização dos testes supracitados. A manutenção de sua utilização neste trabalho, apesar do lançamento de sua 6ª atualização em 2022, é justificada com base em uma análise comparativa das duas versões, tomando por base os mesmos três bancos de dados.

## 3.2 – Descrição das campanhas de medição

Três bancos de dados foram utilizados nas análises deste trabalho. Os cenários escolhidos possuem características criticamente distintas, no que tange, principalmente, ao efeito do ambiente (*clutter*) e do terreno. Isso possibilita testar os modelos de predição em diferentes perspectivas para uma mesma tecnologia de rede sem fio, obtendo assim dados mais abrangentes.

### 3.2.1 – Banco de dados 1: Minas Gerais

O primeiro banco de dados é proveniente dos testes realizados por Bueno (2021), na região próxima a Tupaciguara, em Minas Gerais (MG), Brasil. A área é predominantemente coberta por vegetação de baixo porte, mas com presença de árvores. Por se caracterizar como zona rural, neste cenário são encontradas poucas construções humanas. O terreno apresenta desníveis de vários metros, com regiões de vales e áreas mais altas.

Bueno (2021) estabeleceu trinta enlaces de rádio LoS, para a campanha de medição, organizados como na Figura 3, onde cada terminal é identificado por um número entre 1 e 19. As distâncias entre Tx e Rx variam entre 115m e 3750m.

Optou-se por utilizar o modelo LoRaMESH RD42C como terminal para cada um dos pontos de medição. Os dispositivos foram instalados em mastros de 2,5m de altura, com antenas omnidirecionais de ganho 5dBi. A frequência de portadora empregada para tal campanha de medição foi 915MHz. Os demais parâmetros de configuração dos equipamentos LoRa estão exibidos na Tabela 4.

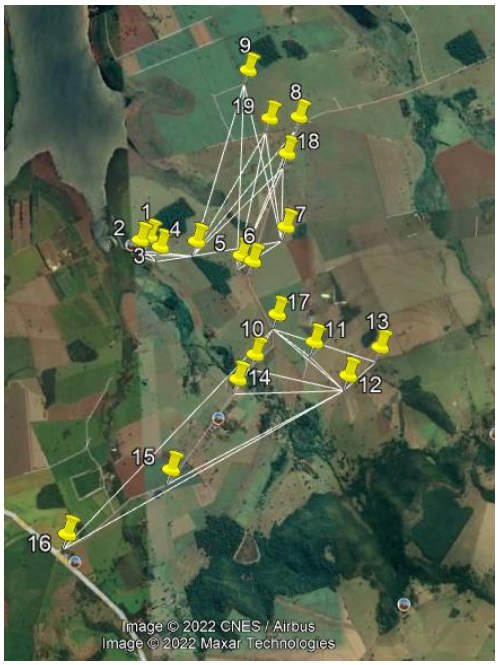



**Figura 3** – Posicionamento dos terminais e dos enlaces da campanha de medição em MG (adaptado de BUENO, 2021)

**Tabela 4** – Parâmetros de configuração do dispositivo LoRa em (BUENO, 2021)

| **Nome do parâmetro de configuração** | **Valor do parâmetro** |
|---|---|
| Fator de Espalhamento (*SF*) | 7 |
| *Coding-Rate* (*CR*) | 4/5 |
| Largura de Banda (*B*) | 500kHz |
| Potência de Transmissão ($P_t$) | 10dBm |

A perda de caminho para cada um dos enlaces foi calculada a partir da coleta de 20 amostras de valores de RSSI (*Received Signal Strength Indication*), por enlace. A estratégia de coleta de dados consistiu na atuação intercalada dos terminais, ora um agindo como transmissor (Tx), ora outro.

Os resultados foram exibidos em um gráfico, que relaciona distância entre terminais e a perda de caminho. Em termos de coleta das informações para realização dos testes nesta dissertação, uma vez que os dados não estão disponíveis em formato de tabela, os valores pertinentes foram retirados diretamente do gráfico, por meio do seguinte procedimento: (a) tendo como base as distâncias fornecidas por Bueno (2021) de cada enlace, os conjuntos de dados do gráfico foram mapeados, relacionando-os com seus respectivos enlaces de rádio e (b) após isso, linhas horizontais foram demarcadas, para valores conhecidos de perda de caminho, obtidas a partir de cálculos de média aritmética sucessivos. Uma vez que uma amostra de perda de caminho era detectada, entre duas retas horizontais com valores conhecidos, o cálculo da média aritmética partia desses dois valores, até que fosse obtida uma reta horizontal que passasse pela amostra em questão.

Esse procedimento é ilustrado na Figura 4, onde a cada conjunto de dados obtidos é atribuído um código, do tipo "nº – nº", que identifica aquele enlace, ao evidenciar os números dos terminais conectados por meio dele.

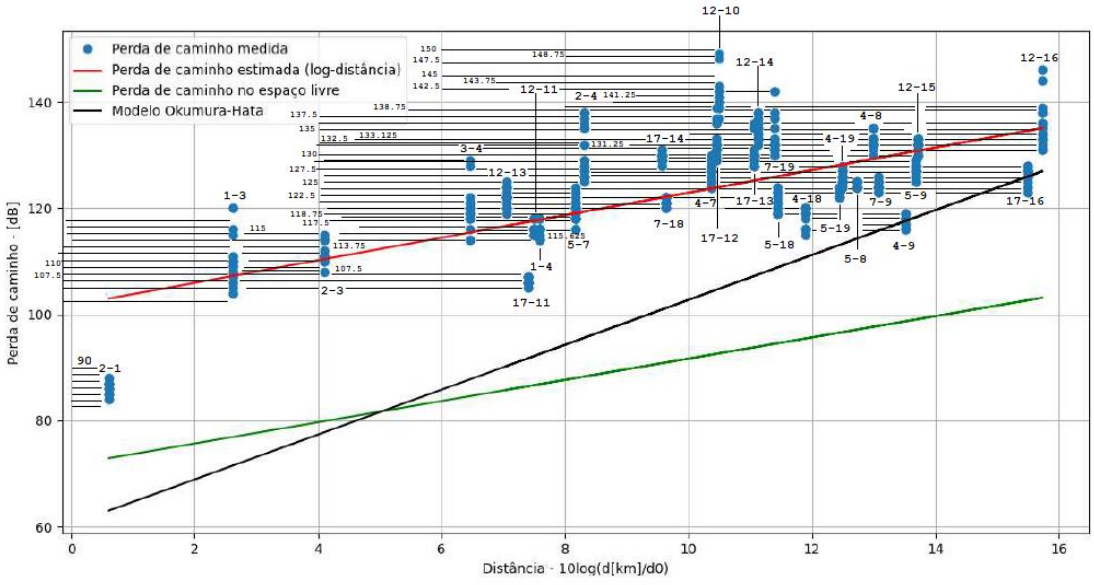



**Figura 4** – Procedimento para extração dos dados de perda de caminho a partir do gráfico (adaptado de BUENO, 2021)

Em posse dos resultados desse método, torna-se possível trabalhar com as amostras em conjunto na análise, ou mesmo com os valores médios da perda de caminho, por meio da aplicação da média aritmética dos dados obtidos, para cada distância.

### 3.2.2 – Banco de dados 2: Finlândia

O segundo banco de dados consiste no estudo realizado por Kalliovaara *et al.* (2017), na cidade de Espoo, Finlândia. Diferentemente do banco de dados 1, esse trabalho não realiza seus testes com tecnologia LoRaWAN, mas sim com LTE. Embora não trate dos sistemas em foco nesta dissertação, a campanha de medição de Kalliovaara *et al.* (2017) foi escolhida, por conta das suas similaridades com as características das redes LoRaWAN e por proporcionar dados precisos de localização dos terminais Tx e Rx, além das distâncias aproximadas de cada enlace e valores de potência de recepção medidas, para cada um deles, a partir dos quais as perdas de caminho associadas podiam ser calculadas. A proximidade desta campanha de medição com uma campanha utilizando redes com dispositivos LoRa se dá por conta das características do método de medição, em primazia: (a) a frequência do sinal medido é de 778MHz, um valor relativamente próximo da portadora de 868MHz, uma das utilizadas por LoRaWAN; (b) as distâncias dos enlaces variam entre, aproximadamente, 780m e 1260m, contidas no limite de 15km das redes LoRaWAN e dentro da faixa de compatibilidade com os modelos Egli e ITU-R P.1812; e (c) a altura do Tx é de 49m acima do nível do solo, valor pertencente à faixa de alturas típicas dessas redes (normalmente, acima dos 10m), também compatível com os dois modelos de propagação.

Os testes foram realizados em nove localidades diferentes da cidade de Espoo, com antenas de 9dBi a 10m do solo. Esses posicionamentos, bem como o da Estação Base (BS), podem ser vistos na Figura 5, marcados em amarelo e vermelho, respectivamente. Somente possuem LoS, com a primeira Zona de Fresnel desobstruída, os enlaces com os terminais “Rx3” e “Rx7”.

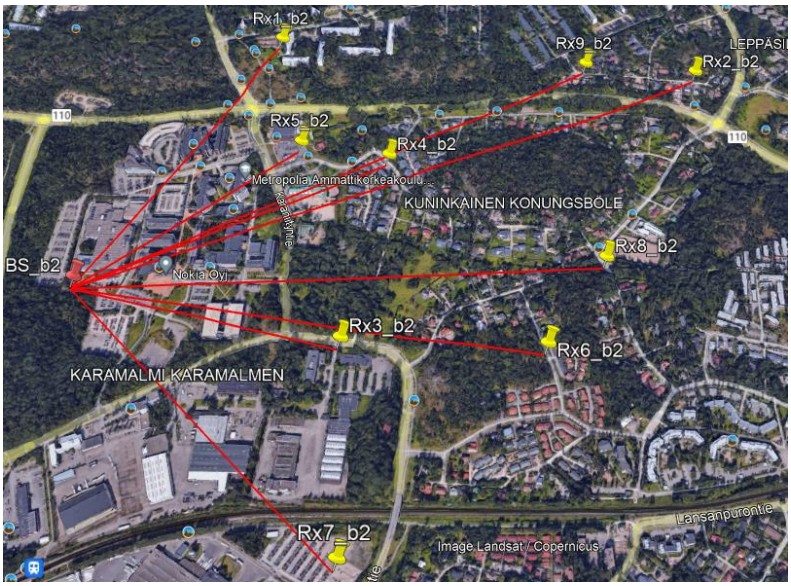



**Figura 5** – Localização da BS e dos pontos de medição do banco de dados 2, imagem do Google Earth

Como pode ser visto na Figura 5, o cenário associado a essa campanha de medição possui predominância de áreas com vegetação e ambientes com presença de construções residenciais. A existência de edifícios está concentrada na região próxima do transmissor (marcado em vermelho na Figura 5), enquanto a presença de áreas abertas e de galpões se concentra ao sul, do lado inferior esquerdo da Figura 5. Os enlaces percorrem os vários cenários desse ambiente heterogêneo, tornando tal experimento singular, em termos de cobertura do solo. A Figura 6 ilustra alguns dos tipos de cobertura encontrados na área, com foco nos altos edifícios, mesclados com a região arborizada.

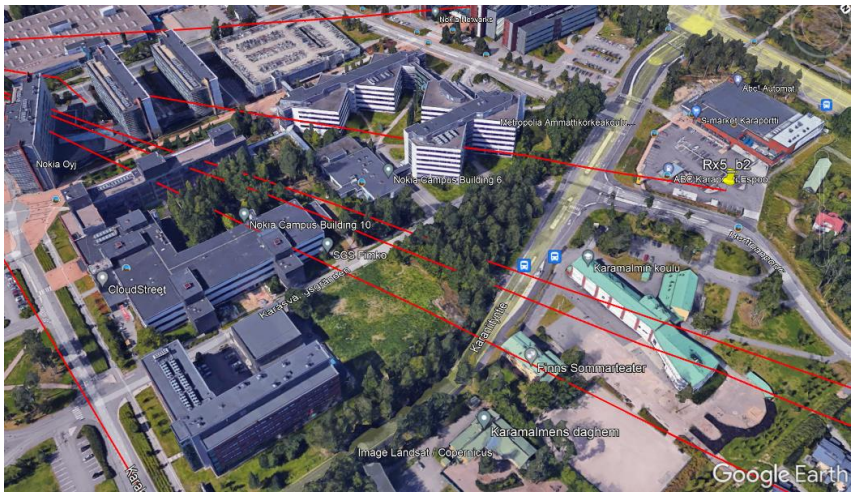



**Figura 6** – Exemplos de coberturas do solo, para a região de Espoo, Finlândia

A EIRP (*Equivalent Isotropically Radiated Power*) utilizada neste experimento foi de 800W e é informada a presença de uma perda de 3,5dB devida ao cabeamento entre a antena no ponto de medição e o analisador de espectro. Os dados de potência recebida, somados às informações de perda devida ao cabo, ao ganho da antena do ponto de medição e à EIRP, possibilitam obter os valores de perda de caminho para cada um dos enlaces, segundo a expressão de cálculo da Equação 5:

$$P_R = EIRP + G_R - L - L_{cabo} \tag{5}$$

em que $P_R$ é a potência recebida, $G_R$ é o ganho da antena de recepção (3,5dB), $L$ é a perda de caminho e $L_{cabo}$ é a perda devida ao cabo. É importante ressaltar que, por não tratar especificamente de redes LoRaWAN, mesmo levando em consideração as similaridades supracitadas, este banco de dados foi utilizado como referência complementar de comparação, quando da realização dos testes deste trabalho.

### 3.2.3 – Banco de dados 3: Rio de Janeiro

O terceiro banco de dados, por sua vez, assim como o primeiro, é proveniente de uma campanha de medição realizada no Brasil. O cenário escolhido foi a Região da Baía de Guanabara, no Rio de Janeiro, com enlaces estabelecidos nas áreas da Ilha do Fundão e da Ilha do Governador (ORTIZ *et al.*, 2019).

O trabalho considera 2 receptores (Rx), um no topo do Edifício do Hospital Universitário Clementino Fraga Filho (HUCFF/UFRJ), e outro no topo do Edifício do Centro de Tecnologia da UFRJ (CT). Ademais, originalmente, foram utilizados 6 transmissores (Tx), nas distâncias de, aproximadamente, 0, 1000, 2000, 3000, 4000 e 5000m (ORTIZ *et al.*, 2019). Para testes nesta dissertação, a distância de 0m foi omitida.

Os 3 enlaces mais curtos (1000m, 2000m e 3000m, aproximadamente) foram estabelecidos entre um Tx próximo ao solo (a uma altura de 2m em relação ao solo, devido ao suporte acoplado ao dispositivo) e o receptor do HUCFF/UFRJ (este a uma altura de 65m em relação ao solo, dada a altura de 63m do edifício e a altura de 2m do suporte do dispositivo). Já os 2 enlaces mais longos (4000m e 5000m, aproximadamente), foram estabelecidos entre Tx a alturas de 2m e o receptor do CT da UFRJ (este a uma altura de 50m em relação ao solo, dada a altura de 48m do edifício e

a altura de 2m do suporte do dispositivo). A Figura 7 ilustra o cenário em questão, posicionando no espaço os receptores e transmissores da campanha de medição.

Os dispositivos LoRa utilizados como Tx e Rx nos testes em questão são descritos por Ortiz *et al.* (2018). Características e parâmetros de importância de seu trabalho são reproduzidos na Tabela 5.




**Figura 7** – Localização dos Transmissores e Receptores na campanha de medição do banco de dados 3

**Tabela 5** – Parâmetros do dispositivo LoRa na campanha de medição do banco de dados 3

| **Nome do parâmetro de configuração** | **Valor do parâmetro** |
|---|---|
| Frequência da portadora | 915MHz |
| Fator de Espalhamento (*SF*) | 7, 8, 9, 10, 11 |
| *Coding Rate* (*CR*) | 4/5 |
| Largura de Banda (*B*) | 500kHz |
| Potência de Transmissão ($P_t$) | 14dBm |
| Ganho da antena de Tx/Rx | 7dBi |

Como exibido na Tabela 5, os testes foram realizados para uma série de fatores de espalhamento. Os resultados de Ortiz *et al.* (2019) exibem a potência de recepção obtida para cada umas das distâncias pré-estabelecidas, sem divergências abruptas, quando comparados os diferentes *SF*. De fato, nenhum resultado apresentou comportamento anormal, quando comparado com os dados de potência dos demais *SF*, com exceção do *SF* 7, na distância de 4000m. Tendo em

vista essa distorção e aparente ausência do resultado para *SF* 7, na distância de 5000m, esta dissertação não leva em consideração esse fator de espalhamento. Uma vez que os testes aqui implementados não trabalham com os efeitos advindos do uso de um SF específico, é interessante obter um único resultado de potência recebida (e *path loss* associada), para cada um dos enlaces implementados por Ortiz *et al.* (2019). Portanto, decidiu-se realizar a média aritmética dos resultados dos SF, em cada distância, gerando assim dados de valores de potência recebida média, para 1000m, 2000m, 3000m, 4000m e 5000m.

Em posse de valores únicos de potência, e dos dados de frequência da portadora, ganhos das antenas de transmissão e recepção e potência transmitida, os quatro últimos representados na Tabela 5, é possível obter as perdas de caminho médias para cada distância, por meio da realização do cálculo de enlace. A Tabela 6 apresenta os valores de potência médios para as distâncias supracitadas, bem como a perda calculada para cada enlace.

**Tabela 6** – Valores de potência recebida média e perda de caminho para os 5 enlaces considerados do banco de dados 3

| **Distância entre Tx-Rx (m)** | **Potência recebida média $P_R$ (dBm)** | **Perda de caminho associada (dB)** |
|---|---|---|
| 1000 | -105 | 133 |
| 2000 | -112,5 | 140,5 |
| 3000 | -107,5 | 135,5 |
| 4000 | -120 | 148 |
| 5000 | -125 | 153 |

## 3.3 – Algoritmo de análise de dados

Os testes foram realizados utilizando a ferramenta GNU Octave, uma linguagem de programação de alto nível, compatível com a aplicação Matlab. Possui capacidade para manipular polinômios, obter resultados de integrais e resolver problemas lineares e não-lineares, e se diferencia de outros semelhantes por ser um *software* livre e gratuito (OCTAVE, 2022a).

Semelhantemente ao Matlab, o GNU Octave possui a funcionalidade de trabalhar com códigos em formato *script*. Como indicado em Octave (2022b), um *script* é o nome dado a um arquivo que contenha uma sequência de comandos, a serem executados em determinada ordem. Esse formato foi escolhido para a elaboração da lógica a ser executada durante as simulações em Octave, e a estrutura geral escolhida para construir tais códigos segue o esquemático apresentado na Figura 8.

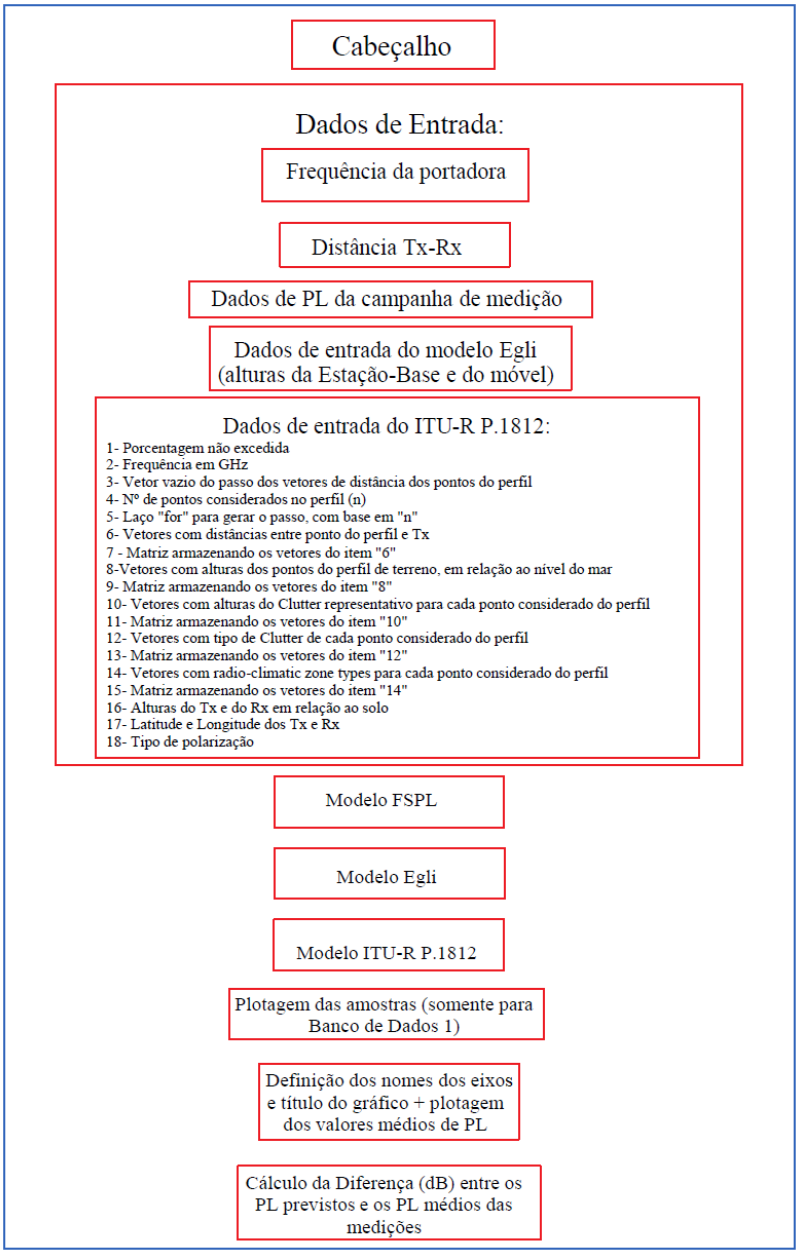



**Figura 8** – Estrutura geral dos códigos Octave elaborados

Como pode ser visto na Figura 8, os *scripts* utilizados para realização dos testes são subdivididos em diversas seções, cada uma com sua função específica, a saber:

(a) **Cabeçalho**: apresenta informações pertinentes, como o autor do código, ano de desenvolvimento, e funções principais;

(b) **Dados de entrada**: conjunto de informações advindas dos bancos de dados e que são necessárias para a correta execução do código e geração dos gráficos e das informações de saída. Esta seção é dividida em:

- **a.** Frequência da portadora: a frequência utilizada pelo sistema durante a execução dos testes do banco de dados;
- **b.** Distância Tx-Rx: aqui consta um vetor com todas as distâncias entre transmissor e receptor retiradas dos bancos de dados e que são pertinentes à execução das predições de perda de caminho;
- **c.** Dados de *PL* da campanha de medição: onde as informações de entrada relativas aos valores de perda de caminho são computadas, sejam elas valores medidos, ou mesmo valores médios de *PL*;
- **d.** Dados de entrada do modelo Egli: onde são informadas as alturas da Estação-Base e do móvel, para possibilitar predição de *PL* usando modelo de propagação de Egli; e
- **e.** Dados de entrada do modelo ITU-R P.1812: aqui são informados dados de interesse particular para predição de *PL* usando o modelo de propagação ITU-R P.1812. O grande volume de dados necessários aqui é dividido em 18 tipos distintos, que estão descritos na Figura 8;

(c) **Modelo FSPL**: espaço reservado para formulação do modelo de Espaço Livre, bem como da lógica associada para sua correta execução;

(d) **Modelo Egli**: espaço reservado para formulação do modelo de Egli, bem como da lógica associada para sua correta execução;

(e) **Modelo ITU-R P.1812**: espaço reservado para formulação do modelo ITU-R P.1812, bem como da lógica associada para sua correta execução;

(f) **Plotagem das amostras**: reservado para lógica pertinente à geração de gráfico com as amostras de *PL* de cada enlace. Somente presente para os *scripts* associados ao banco de dados 1;

(g) **Definição dos nomes dos eixos e título do gráfico + plotagem dos valores médios de PL**: área do código utilizada para configuração dos nomes dos eixos e título de gráfico, além da lógica associada à exibição, em tela, dos valores médios de *PL*, em formato gráfico; e

(h) **Cálculo da Diferença (dB) entre os *PL* previstos e os *PL* médios das medições**: essa área do código é reservada para a lógica do cálculo da diferença, em dB, entre os valores de perda de caminho previstos pelos modelos de propagação e os valores médios obtidos das informações dos bancos de dados. Essas informações são indispensáveis para as análises desta dissertação.

## 3.4 – Abordagens de tratamento de dados de entrada de *clutter*

Como citado na seção 3.1 do capítulo, esta dissertação avalia duas diferentes abordagens de tratamento de dados de entrada de altura representativa de *clutter*. Esse conceito, apresentado anteriormente no capítulo 2, é um fator fundamental para a correta predição de enlace ao utilizar o modelo de propagação ITU-R P.1812, pois é com base nesses valores de altura que são computadas as informações de cobertura do terreno, ao longo do enlace e ao redor dos terminais.

### 3.4.1 – Abordagem 1

Esta estratégia de interpretação dos dados realiza a análise de cobertura do solo, ponto a ponto, iniciando no terminal Tx e finalizando no terminal Rx, ou seja, são avaliados, de forma independente, cada um dos pontos que compõem o vetor distância Tx-Rx $\mathbf{d} = [d_1, d_2, \dots, d_n]$, gerando assim, para cada $d_m$, com $m = 1, \dots, n$, um valor de altura de *clutter* $R_m$ associado.

Esse processo minucioso, observado nos dados de validação para o modelo P.1812 em ITU-R (2023), tem a vantagem de computar ligeiras variações da cobertura do terreno que podem ocorrer de um ponto a outro imediatamente subsequente. O grau de precisão é diretamente afetado pela quantidade de pontos do terreno que forem considerados ao longo do enlace. Dessa forma, projetos que demandem alto grau de exatidão na aquisição dos dados tendem a captar, também, variações mais sutis da cobertura do solo, ao se utilizar a abordagem 1. As alturas representativas de *clutter* utilizadas para a implementação de tal estratégia são aquelas apresentadas como valores padrão para o vetor **R** em ITU-R (2019), para terminais e pontos intermediários do enlace, entre Tx e Rx. No entanto, essas informações da Recomendação, originalmente, parecem considerar enlaces totalmente uniformes, sem alteração da cobertura de terreno entre terminais. Diferentemente, para a abordagem 1, tais valores foram empregados ponto a ponto, com o objetivo de computar a eventual alteração do ambiente, seguindo as recomendações reproduzidas na Tabela

7, para cada $d_m$. No Apêndice II desta dissertação são listados os valores utilizados nesta abordagem para o vetor **R** de todos os testes realizados com os 3 bancos de dados.

**Tabela 7** – Alturas representativas de *clutter* consideradas nas abordagens 1 e 3, de acordo com o tipo de cobertura do solo (ITU-R, 2019)

| **Tipo de *clutter*** | **Altura representativa de *clutter* (m)** | |
|---|---|---|
| | **Para pontos intermediários entre Tx e Rx** | **Para terminais Tx ou Rx** |
| Corpos d'água | 0 | 10 |
| Aberto/rural | 0 | 10 |
| Suburbano | 10 | 10 |
| Urbano/com Árvores/Floresta | 15 | 15 |
| Urbano denso | 20 | 20 |

### 3.4.2 – Abordagem 2

A abordagem 2 proposta utiliza as mesmas alturas representativas de *clutter* representadas na Tabela 7. No entanto, sua implementação é mais generalista, no sentido de se basear no tipo de cobertura do solo predominante, para definir o modo com que são tratadas essas informações. Dessa forma, em vez de avaliar o enlace ponto a ponto, como é realizado na abordagem 1, neste tratamento de dados alternativo, admite-se 1 único valor de altura representativa de *clutter* para todos os pontos entre Tx e Rx. Individualmente, os terminais também são avaliados, com base nos seus arredores. A determinação de qual tipo de *clutter* é preponderante pode ser realizada por meio da avaliação visual do ambiente no qual está inserido o enlace. Esse processo pode ser realizado *in loco*, ou mesmo por meio de *softwares* de imagem, como o Google Earth.

A técnica pode ser empregada em cenários onde não é necessário computar todas as informações de altura representativa, ponto a ponto, para se determinar qual cobertura de terreno se sobressai, em comparação com as demais. Portanto, a utilização da abordagem 2 tem o potencial de acelerar o processo de tratamento dos dados de entrada, principalmente para projetos que exijam uma grande quantidade de pontos de amostragem nos percursos dos enlaces. A Figura 9 ilustra o método para um enlace em particular. No Apêndice II desta dissertação são listados os valores utilizados nesta abordagem para os valores de *clutter* predominante de todos os testes realizados com os 3 bancos de dados.

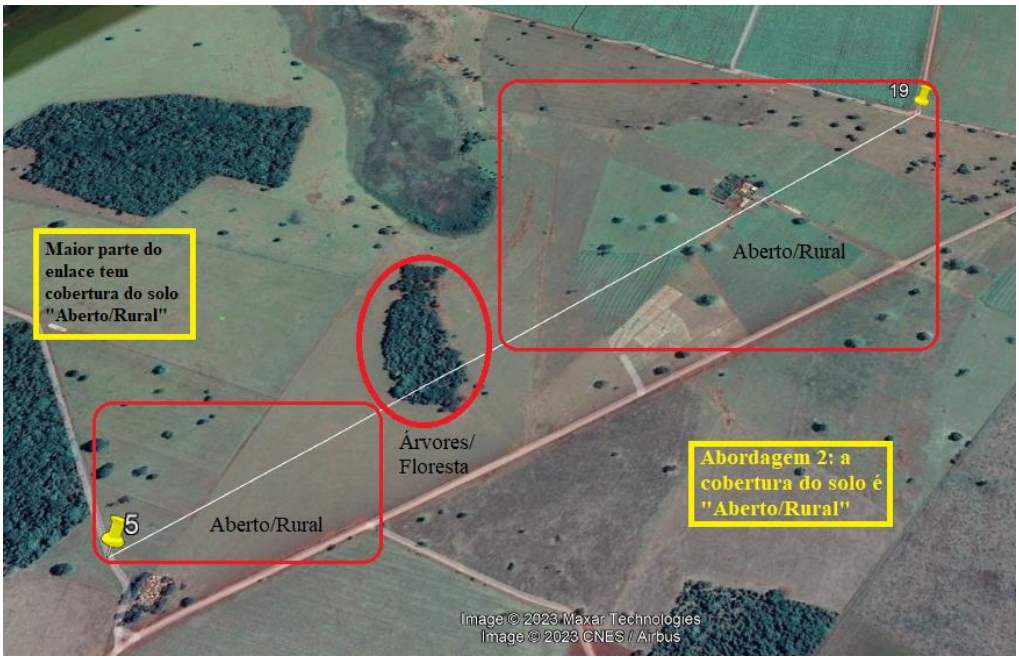



**Figura 9** – Demonstração da abordagem 2 por análise visual da cobertura do solo no enlace

Portanto, a escolha da abordagem 2 para um conjunto de enlaces torna menos dispendiosa a obtenção das informações de alturas de *clutter* para todos os enlaces que possuam diferenças pouco significativas da extensão das coberturas do solo. Já para aqueles em que haja proporções semelhantes de 2 ou mais tipos de *clutter*, entende-se ser necessário computar, ponto a ponto, essas informações, como na abordagem 1. Posteriormente, é feita uma contagem da quantidade de pontos com determinadas coberturas de solo, para se determinar qual é preponderante, sobre as demais. Esse processo, no entanto, mesmo sendo mais demorado que a análise visual, pode ter sua etapa de contagem automatizada por implementação em código, mantendo ainda assim, a simplicidade do método, de forma geral, em comparação com a abordagem 1.

# 4. Análise e resultados

Este capítulo descreve aquilo que foi obtido a partir da realização das simulações com o *software* Octave, e é dividido da seguinte forma: a seção 4.1 descreve conceitos utilizados para estabelecer a comparação dos dados advindos dos testes subsequentes.

As seções 4.2, 4.3 e 4.4, por sua vez, são destinadas à apresentação e discussão dos resultados dos testes para os bancos de dados 1, 2 e 3, respectivamente. O final de cada uma das três é reservado para as conclusões parciais, partindo dos comentários referentes à comparação entre os dados obtidos em cada seção respectiva.

A seção 4.5, "Conclusões da análise", estabelece a interpretação global dos dados, tendo em vista o que foi apresentado nos resultados parciais. Adicionalmente, a seção 4.6, "A escolha do modelo P.1812-5, em face da nova versão P.1812-6", busca justificar a utilização da 5ª versão do modelo de propagação ITU-R P.1812 durante todo o trabalho, tendo em vista o lançamento de sua 6ª geração. Tal seção apresenta o resultado de testes realizados pelo autor, com o objetivo de obter comparações sucessivas de ambas as versões, nos cenários dos 3 bancos de dados utilizados nas seções anteriores, levando em consideração ambas as abordagens de tratamento de dados de entrada de *clutter*.

Ao longo das seções deste capítulo, é ressaltada a aparente falta de informação sobre polarização utilizada em alguns dos bancos de dados obtidos e suas implicações. Também são realizados testes comparativos, com uso de diferentes técnicas de polarização abordadas pela recomendação ITU-R P.1812, com o intuito de determinar as consequências da escolha de uma determinada polarização em Tx/Rx.

## 4.1 – Conceitos para avaliação dos dados

Como apresentado anteriormente, no Capítulo 2, o modelo de propagação ITU-R P.1812 tem associado a ele, três vetores de dados de entrada principais, o vetor distância Tx-Rx **d**, o vetor altura do perfil de terreno **h**, e o vetor altura representativa de *clutter* **R** (ITU-R, 2019). No entanto, diferentemente dos demais, este último depende de um certo nível preponderante de subjetividade, uma vez que pressupõe a classificação de porções de terreno em níveis pré-existentes, esses já citados por ITU-R (2019): *water/sea*, *open/rural*, *suburban*, *urban/trees/forest* e *dense urban*. E essa mesma subjetividade permite interpretações diferentes quanto ao modo de tratar os dados referentes à altura representativa de *clutter*. Neste capítulo, a correlação entre o grau de

complexidade atribuído a esse processo e o desempenho quanto à previsão, usando o modelo P.1812, é avaliada. Tal avaliação é realizada por meio da introdução dos seguintes conceitos, a saber:

(a) Separação Individual[1] (dB) ou $S_i$: refere-se à diferença (absoluta) entre um valor previsto de perda de enlace e o valor médio medido para aquele enlace (média de todas as amostras de perda medidas naquele enlace);

(b) Separação Média[2] (dB) ou $S_{média}$: é a média aritmética de todas as separações individuais (dB), referente ao uso particular de uma abordagem de tratamento de dados de entrada de *clutter*, quando há comparação entre duas abordagens distintas; ou ainda ao uso particular de uma versão de modelo de propagação, quando há comparação entre duas versões distintas. Sejam as duas abordagens, ou as duas versões do modelo, associadas a um par de conjuntos de dados, cada um dos conjuntos possui uma separação média (dB) que representa o quão distante, globalmente, o previsto está do que foi medido, para aquele conjunto em particular;

(c) Δ (dB): diferença entre duas separações individuais (dB), referentes ao mesmo enlace, cada uma associada ao uso de uma abordagem de tratamento de dados de entrada de *clutter* particular, ou ainda a uma versão do modelo de propagação empregado, a depender da circunstância dos testes;

(d) $\Delta_{médio}$ (dB): é a média aritmética de todos os valores Δ (dB) obtidos ao longo do teste. Este número é também a diferença entre as separações médias (dB) de cada um dos dois conjuntos de dados comparados, em cada teste. Se $\Delta_{médio} > 0$, há uma elevação da separação média (dB) ao se alterar as condições do 1º conjunto de dados para o 2º conjunto de dados, ou seja, observa-se um afastamento entre o previsto e o medido, de forma global (considerando cada um dos enlaces utilizados na simulação). Se, ao contrário, $\Delta_{médio} < 0$, ocorre uma aproximação entre previsto e medido, em média, ou seja, uma redução de $S_{média}$; e

(e) Desvio Padrão (dB), ou $\sigma_S$: quantifica o grau de dispersão em torno do valor da separação média (dB) de um conjunto de dados de separação individual (dB). Valores menores de $\sigma_S$ refletem menor disparidade para os resultados dos testes de um modelo de propagação em particular, com relação aos dados de medição obtidos. Em análises de comparação entre abordagens ou entre modelos, reduções nos valores $\sigma_S$ indicam diminuição dessa disparidade, o que pode representar uma melhora na consistência.

[1]Conceito mencionado por CAVALCANTI (2005) como "erro absoluto".

[2]Conceito referenciado por CAVALCANTI (2005) como "erro médio absoluto", ou "erro absoluto médio" e "erro médio de predição" por REZENDE (2017).

## 4.2 – Testes para o banco de dados 1

O banco de dados 1 é, dentre os três selecionados para essa pesquisa, aquele com maior quantidade de enlaces, abrangendo uma área rural relativamente extensa que inclui uma série de particularidades, tais como lagos, construções humanas esparsas, ambientes abertos e áreas de bosque, além de vales e regiões de terreno com poucas variações de altura.

As simulações realizadas para este cenário LoRa seguiram os parâmetros apresentados na subseção 3.2.1 e a estrutura de código estabelecida na seção 3.3, com inclusão do bloco particular "Plotagem das amostras", uma vez que este é o único banco de dados que apresentou valores de amostra por enlace, conforme apontado na Figura 4. Esses códigos são exibidos, em sua integralidade, no Apêndice I desta dissertação, como ilustração da implementação. Para a exibição dos dados gráficos, optou-se pela escala logarítmica, com utilização de valores de distância normalizados à distância de referência de 0,1km. Tendo em vista que não é informado em Bueno (2021) o tipo de polarização empregado na campanha de medição, os testes foram realizados para ambas as modalidades previstas no modelo ITU-R P.1812, polarização horizontal e polarização vertical. Neste quesito, não foram observadas alterações dos resultados para este banco de dados, com a modificação do parâmetro.

Foram considerados trinta pontos de perfil de terreno, para cada enlace. As Figuras 10 e 11 exibem, para as abordagens 1 e 2, respectivamente, os gráficos de distância vs. perda de caminho com a plotagem das amostras e dos seus valores médios, bem como das predições por meio dos modelos de propagação ITU-R P.1812, Egli e espaço livre (FSPL).

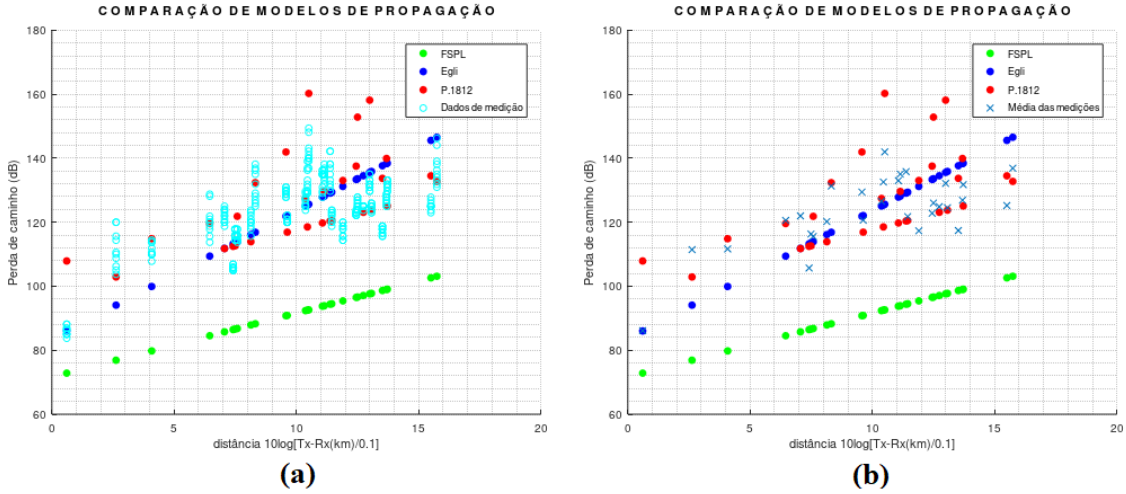



**Figura 10** – Exibição dos dados de saída para o banco de dados 1 utilizando a abordagem 1 (polarizações horizontal/vertical): (a) *PL* previstos e amostras de medição; (b) *PL* previstos e médias das medições

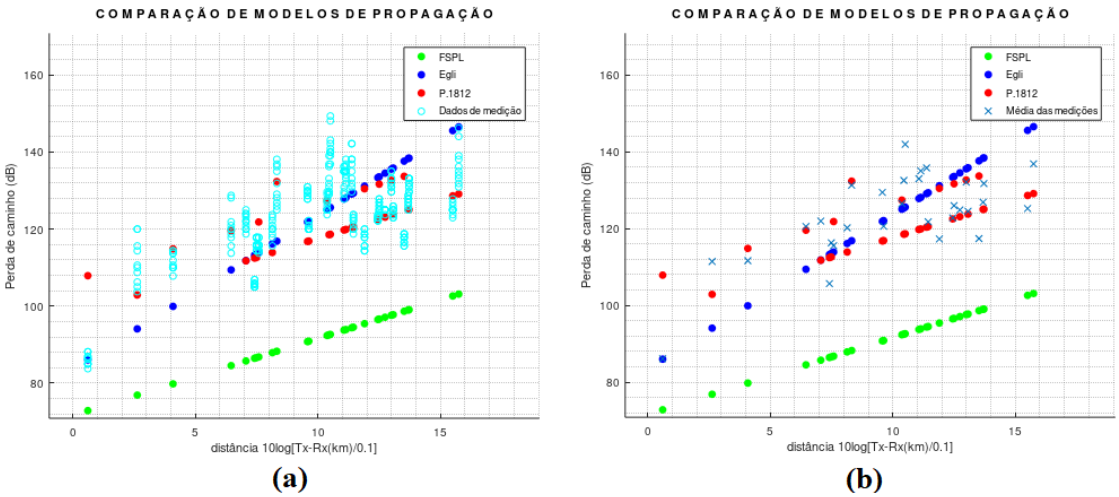



**Figura 11** – Exibição dos dados de saída para o banco de dados 1 utilizando a abordagem 2 (polarizações horizontal/vertical): (a) *PL* previstos e amostras de medição; (b) *PL* previstos e médias das medições

Os gráficos (a) das Figuras 10 e 11 são resultado direto do procedimento de obtenção de dados de medição apresentado na subseção 3.2.1. Tais valores parecem se aglomerar, de enlace em enlace, em torno de seu nível médio, demarcado nos gráficos (b) de cada figura, com um "x". Uma análise visual preliminar indica que o modelo do espaço livre, FSPL (em verde), foi, de fato, o mais otimista, no que tange à predição de perda de caminho, para cada um dos enlaces, uma vez que indica os seus menores valores. O modelo de Egli (em azul), por outro lado, cruza o conjunto de dados, apresentando resultados mais próximos da realidade. De forma semelhante, o modelo ITU-R P.1812 (em vermelho) traça suas predições relativamente próximas dos valores médios de medição, para ambas as abordagens de tratamento de dados de altura representativa de *clutter*. Seu comportamento, aparentemente mais errático em comparação com os demais, é resultado de sua natureza *path-specific*.

Adicionalmente, comparando-se as duas abordagens do modelo P.1812, expostas nas Figuras 10 e 11, observa-se uma tendência dos valores previstos de perda de caminho se aproximarem, entre si, parecendo sugerir uma redução da dispersão desses resultados, em particular para os enlaces com maiores distâncias entre Tx e Rx. Como forma de facilitar a análise, os valores de $S_i$ (dB) foram calculados, para cada enlace e cada modelo de propagação e organizados na Tabela 8.

**Tabela 8** – Resultados numéricos para o banco de dados 1 (FSPL, Egli, ITU-R P.1812, abordagens 1 e 2, polarizações horizontal/vertical)

| Banco de Dados 1 (Polarizações Horizontal/Vertical) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Nº do enlace | FSPL | Egli | ITU-R P.1812 | | |
| | | | Abordagem 1 (y) | Abordagem 2 (x) | Δ = x - y (dB) |
| 2-1 | 13,28300 | 0,10686 | 21,76954 | 21,76954 | 0,00000 |
| 1-3 | 34,56000 | 17,34923 | 8,54825 | 8,54825 | 0,00000 |
| 2-3 | 31,86300 | 11,73643 | 3,18914 | 3,18914 | 0,00000 |
| 3-4 | 36,02600 | 11,15539 | 0,97347 | 0,97347 | 0,00000 |
| 12-13 | 36,22300 | 10,14398 | 10,21125 | 10,21125 | 0,00000 |
| 17-11 | 19,23600 | 7,54879 | 6,77576 | 6,77576 | 0,00000 |
| 12-11 | 29,70500 | 2,76376 | 3,69302 | 3,69302 | 0,00000 |
| 1-4 | 28,77100 | 1,64609 | 6,28118 | 6,28118 | 0,00000 |
| 5-7 | 32,31900 | 4,08529 | 6,30691 | 6,30691 | 0,00000 |
| 2-4 | 43,04700 | 14,44749 | 1,04585 | 1,04585 | 0,00000 |
| 17-14 | 38,66700 | 7,56215 | 12,50863 | 12,65471 | 0,14608 |
| 7-18 | 29,74900 | 1,46000 | 3,73739 | 3,73739 | 0,00000 |
| 4-7 | 34,16200 | 1,45991 | 0,88990 | 0,88990 | 0,00000 |
| 17-12 | 40,03500 | 7,17502 | 14,02364 | 14,02364 | 0,00000 |
| 12-10 | 49,33300 | 16,36334 | 18,27674 | 23,32093 | 5,04419 |
| 17-13 | 39,24800 | 5,16214 | 13,23596 | 13,23596 | 0,00000 |
| 12-14 | 41,12400 | 6,88329 | 5,40163 | 15,11216 | 9,71053 |
| 7-19 | 41,43100 | 6,71546 | 15,41886 | 15,41886 | 0,00000 |
| 5-18 | 27,25200 | 7,59511 | 1,24014 | 1,24014 | 0,00000 |
| 4-18 | 21,88900 | 13,86856 | 15,72757 | 13,16351 | -2,56406 |
| 5-19 | 26,29900 | 10,54881 | 14,71345 | 0,28673 | -14,42672 |
| 4-19 | 29,37800 | 7,57772 | 26,83605 | 5,67434 | -21,16171 |
| 5-8 | 27,77700 | 9,65379 | 1,76549 | 1,76549 | 0,00000 |
| 4-8 | 34,51100 | 3,43679 | 26,01646 | 0,54137 | -25,47509 |
| 7-9 | 26,76600 | 11,33312 | 0,75395 | 0,75395 | 0,00000 |
| 4-9 | 18,75000 | 20,24036 | 16,30253 | 16,30253 | 0,00000 |
| 5-9 | 27,88100 | 11,44670 | 13,03865 | 1,86904 | -11,16961 |
| 12-15 | 32,69300 | 6,69771 | 6,68103 | 6,68103 | 0,00000 |
| 17-16 | 22,61100 | 20,34540 | 9,26228 | 3,40062 | -5,86166 |
| 12-16 | 33,76600 | 9,67647 | 4,12116 | 7,75415 | 3,63299 |
| **S média (dB) =** | **31,61183** | **8,87284** | **9,62486** | **7,55403** | - |
| **σ_s (dB) =** | **7,94604** | **5,38881** | **7,46585** | **6,54890** | **-** |
| | | | **Δ médio (dB) =** | | **-2,07084** |

Dos enlaces nº 2-1 a 12-16, são exibidos também, na Tabela 8, os valores das diferenças entre as separações individuais das duas abordagens, para o modelo de propagação P.1812. Ao final, estão destacados o valor $\Delta_{médio}$ (dB) para o modelo da ITU-R, bem como a $S_{média}$ (dB) e o $\sigma_S$ (dB) para cada um dos casos considerados e exibidos nas Figuras 10 e 11.

Como pode ser visto, o menor valor de $S_{média}$ (dB) foi observado para a abordagem 2 de tratamento de dados de entrada de altura representativa de *clutter*, no modelo ITU-R P.1812, com 7,55403dB, aproximadamente 1,3dB abaixo do obtido pelo modelo de Egli, o segundo com o melhor desempenho, neste quesito. Esse parâmetro indica que a segunda solução de implementação para o modelo P.1812 possui um menor afastamento (dB), em média, ou de forma global, entre o previsto e o medido. O maior valor de $S_{média}$ (dB) pertence ao modelo FSPL.

No que tange ao parâmetro $\sigma_S$ (dB), por outro lado, seu menor valor foi obtido para o modelo de Egli, com 5,38881dB. O registro mais elevado novamente pertence ao modelo FSPL. Comparando-se as abordagens 1 e 2, detectou-se uma redução de aproximadamente 0,92dB com

a adoção da abordagem 2, para este cenário de testes, indicando redução do grau de dispersão dos dados.

Por fim, o registro do valor de $\Delta_{médio}$ (dB) foi negativo (< 0) com a adoção da abordagem 2, tendo como referência o uso da abordagem 1. Como descrito anteriormente, este dado assinala uma aproximação (em dB), entre o previsto e o medido, uma vez substituída a abordagem 1 pela abordagem 2, indicando assim um desempenho melhor da última, neste quesito.

Portanto, para os testes realizados utilizando o banco de dados 1, observou-se consolidado destaque da abordagem 2, em comparação com a abordagem 1, para a análise de $\sigma_S$ (dB) e $\Delta_{médio}$ (dB). Adicionalmente, ressaltam-se os valores reduzidos de $S_{média}$ (dB) e $\sigma_S$ (dB) para o modelo de Egli, o que parece apontar para afastamentos (dB) globais e disparidade dos resultados comparativamente pequenos.

### 4.3 – Testes para o banco de dados 2

O banco de dados 2 se caracteriza por seus aspectos heterogêneos, no que tange à cobertura do solo. Neste cenário, estão presentes áreas residenciais, mas também regiões altamente arborizadas, ambientes abertos e altos edifícios. Trata-se também de um terreno com flutuações consideráveis de altura do perfil. Da extração dos dados de terreno, obteve-se alturas de cerca de 25 metros acima do nível do mar, mas também regiões que chegam a aproximadamente 60 metros de altura.

As simulações realizadas obedeceram aos parâmetros apresentados na subseção 3.2.2 e a estrutura de código estabelecida na seção 3.3, sem o bloco “Plotagem das amostras”. Novamente, a exibição dos gráficos utilizou a escala logarítmica, com distância normalizada à distância de referência de 0,1km e os testes foram feitos para as modalidades de polarização horizontal e vertical, uma vez que Kalliovaara *et al.* (2017) não explicitam qual delas foi realmente empregada nos testes. A modificação deste parâmetro não alterou os resultados.

Semelhantemente à seção 4.2, foram considerados trinta pontos de perfil de terreno, para cada um dos nove enlaces. A Figura 12 exibe, para as abordagens 1 e 2, os gráficos de distância vs. perda de caminho, com plotagem dos valores médios resultantes das medições da campanha, bem como a plotagem das predições por meio dos modelos de propagação ITU-R P.1812, Egli e FSPL.

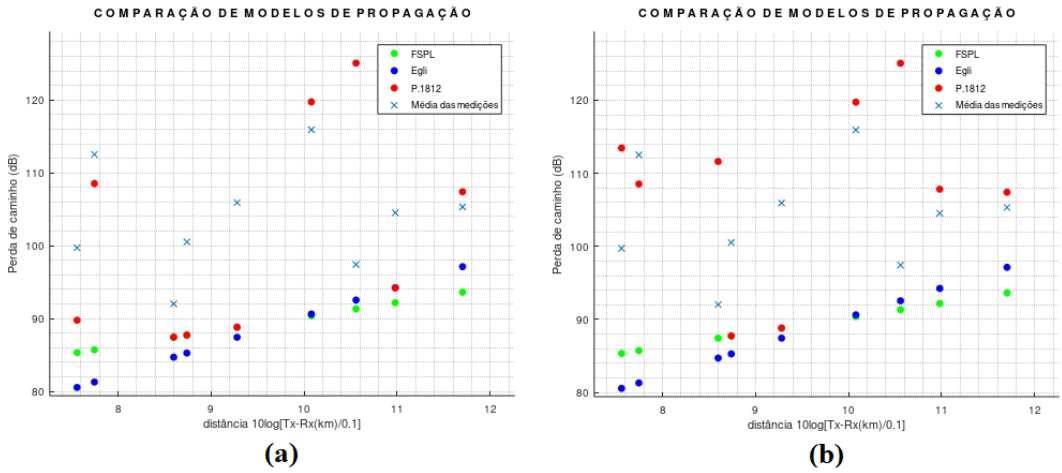



**Figura 12** – Exibição dos dados de saída para o banco de dados 2 (polarizações horizontal/vertical): (a) abordagem 1; (b) abordagem 2

Observando os gráficos (a) e (b) da Figura 12, chama atenção, de imediato, o modelo de Egli (em azul), quando comparado com o modelo de propagação FSPL (em verde): para os cinco primeiros enlaces, é o modelo de Egli que assume os valores mais otimistas, e não o modelo do espaço livre. Esse comportamento somente se reverte para os últimos quatro enlaces. A aparência ordenada desses dois modelos novamente não se repete para P.1812 (em vermelho), o que também permite que alguns de seus valores se aproximem das medições (marcadas com "x") mais afastadas, em relação às predições dos demais métodos. Com o objetivo de viabilizar a análise numérica, a Tabela 9 exibe os valores de $S_i$ (dB) associados a cada um dos enlaces e modelos de propagação.

**Tabela 9** – Resultados numéricos para o banco de dados 2 (FSPL, Egli, ITU-R P.1812, abordagens 1 e 2, polarizações horizontal/vertical)

| Banco de Dados 2 (Polarizações Horizontal/Vertical) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Nº do enlace | FSPL | Egli | ITU-R P.1812 | | |
| | | | Abordagem 1 (y) | Abordagem 2 (x) | Δ = x - y (dB) |
| 5 | 14,3929 | 19,1793 | 9,9537 | 13,7359 | 3,7822 |
| 3 | 26,8201 | 31,2337 | 3,9964 | 3,9964 | 0,0000 |
| 4 | 4,6166 | 7,3258 | 4,5666 | 19,5881 | 15,0215 |
| 1 | 12,8324 | 15,2583 | 12,7824 | 12,7824 | 0,0000 |
| 7 | 17,1527 | 18,499 | 17,1027 | 17,1027 | 0,0000 |
| 6 | 25,5555 | 25,3044 | 3,8157 | 3,8157 | 0,0000 |
| 8 | 6,0952 | 4,8839 | 27,6425 | 27,6425 | 0,0000 |
| 9 | 12,3514 | 10,2963 | 10,2928 | 3,2939 | -6,9989 |
| 2 | 11,7052 | 8,2039 | 2,0782 | 2,0782 | 0,0000 |
| **S média (dB) =** | **14,61356** | **15,57607** | **10,24789** | **11,55953** | - |
| **σ_s (dB) =** | **7,61964** | **8,84621** | **8,18190** | **8,91251** | - |
| | | | **Δ médio (dB) =** | | **1,31164** |

O formato de exibição dos resultados é análogo ao apresentado na Tabela 8, tendo como resultado para análise os parâmetros Δ (dB) e $\Delta_{médio}$ (dB), no que tange à comparação entre as duas abordagens de tratamento de dados de entrada de altura representativa do *clutter*, para o modelo ITU-R P.1812, bem como $S_{média}$ (dB) e o $\sigma_S$ (dB), para todos os modelos de propagação levados em consideração.

O menor valor obtido de $S_{média}$ (dB) diz respeito à implementação da abordagem 1 do modelo ITU-R P.1812, com 10,24789dB, aproximadamente 1,3dB abaixo da abordagem 2, segunda implementação com melhor desempenho. Por outro lado, o maior valor observado para tal parâmetro ocorreu para o modelo de Egli.

Comparando-se os valores finais de $\sigma_S$ (dB), é evidente que o modelo FSPL detém a melhor colocação, com o menor valor obtido de 7,61964dB. Já o registro mais elevado pertence à abordagem 2 do modelo ITU-R P.1812. Comparando-se ambas as abordagens, detectou-se uma elevação de aproximadamente 0,73dB, com a adoção da abordagem 2, para este cenário de testes, indicando aumento do grau de dispersão dos dados.

Por fim, o valor de $\Delta_{médio}$ (dB) foi positivo (> 0), com a adoção da abordagem 2, tendo como referência o uso da abordagem 1. Essa característica equivale a um afastamento (em dB), entre o previsto e o medido, quando substituída a abordagem 1 pela abordagem 2, o que assinala um pior desempenho da última, neste quesito. Ressalta-se, todavia, que os resultados individuais dos valores de Δ (dB) foram, majoritariamente, nulos, com apenas três de nove enlaces experimentando alteração de seu valor de $S_i$ (dB).

Portanto, para os testes realizados utilizando o banco de dados 2, observou-se consolidado destaque da abordagem 1, em comparação com a abordagem 2, para a análise de $\sigma_S$ (dB) e $\Delta_{médio}$ (dB). A análise mais minuciosa dos resultados de Δ (dB), porém, aponta que as duas abordagens apresentaram discretas diferenças na campanha como um todo, com resultados idênticos para a grande maioria dos enlaces, no que diz respeito à separação individual (dB) entre valores previstos e valores medidos.

### 4.4 – Testes para o banco de dados 3

O banco de dados 3, de modo semelhante ao banco de dados 2, possui uma grande variedade de tipos de cobertura do solo ao longo dos enlaces utilizados na campanha de medição, estando presentes regiões de corpos d'água, ambientes abertos e de bosque, além de áreas com edifícios. Não se trata de um ambiente caracterizado por grande quantidade de flutuações de altura

de perfil. Da extração dos dados, obteve-se uma altura mínima de 0 metros acima do nível do mar (nos corpos d'água), com um pico máximo de 12 metros.

As simulações obedeceram aos parâmetros apresentados na subseção 3.2.3 e a estrutura de código estabelecida na seção 3.3, sem o bloco "Plotagem das amostras". A exibição dos gráficos seguiu o padrão de escala logarítmica descrito nas seções anteriores. Diferentemente dos bancos de dados 1 e 2, esta campanha tem definida a modalidade de polarização empregada, vertical (ORTIZ *et al.*, 2019). Por este motivo, somente polarização vertical foi utilizada durante a realização dos testes.

Semelhantemente às seções 4.2 e 4.3, foram considerados trinta pontos de perfil de terreno, desta vez para cada um dos cinco enlaces. A Figura 13 exibe, para as abordagens 1 e 2, os gráficos de distância vs. perda de caminho, com plotagem dos valores médios resultantes das medições da campanha, bem como a plotagem das predições por meio dos modelos de propagação ITU-R P.1812, Egli e FSPL.

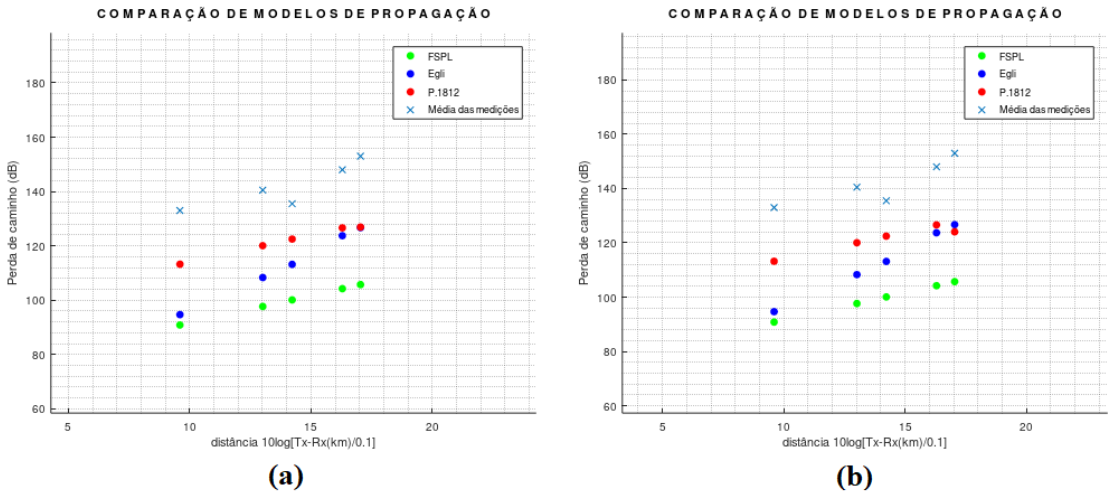



**Figura 13** – Exibição dos dados de saída do banco de dados 3 (polarização vertical): (a) abordagem 1; (b) abordagem 2

Nos gráficos (a) e (b) da Figura 13 destaca-se o modelo ITU-R P.1812 (em vermelho), cujas predições mostram-se mais próximas dos valores médios das medições, em sua maioria. Aqui, novamente, o modelo FSPL (em verde) é o mais otimista, enquanto o modelo de Egli (em azul) resulta, na maior parte dos casos, em valores intermediários, que tendem a se aproximar dos do modelo P.1812, para os enlaces de distâncias superiores. Novamente, para viabilizar a análise numérica, no que tange a este cenário LoRaWAN, foi elaborada a Tabela 10, que exibe os valores de $S_i$ (dB) associados a cada um dos enlaces e modelos.

**Tabela 10** – Resultados numéricos para o banco de dados 3 (FSPL, Egli, ITU-R P.1812, abordagens 1 e 2, polarização vertical)

| Banco de Dados 3 (Polarização Vertical) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Nº do enlace | FSPL | Egli | ITU-R P.1812 | | |
| | | | Abordagem 1 (y) | Abordagem 2 (x) | Δ = x - y (dB) |
| 1 | 42,172 | 38,340 | 19,780 | 19,780 | 0,000 |
| 2 | 42,847 | 32,190 | 20,455 | 20,455 | 0,000 |
| 3 | 35,423 | 22,343 | 13,032 | 13,032 | 0,000 |
| 4 | 43,785 | 24,289 | 21,394 | 21,394 | 0,000 |
| 5 | 47,289 | 26,295 | 26,110 | 28,923 | 2,813 |
| **S média (dB) =** | **42,30320** | **28,69140** | **20,15420** | **20,71680** | - |
| **σ_s (dB) =** | **4,32157** | **6,53379** | **4,68948** | **5,65249** | - |
| | | | **Δ médio (dB) =** | | **0,56260** |

A Tabela 10 repete o padrão de exibição das apresentadas nas seções anteriores, tendo como parâmetros de análise Δ (dB) e $\Delta_{médio}$ (dB), $S_{média}$ (dB) e $\sigma_S$ (dB), sendo os dois primeiros pertinentes apenas para comparação entre as abordagens do modelo ITU-R P.1812.

O menor valor computado, neste cenário, para $S_{média}$ (dB), ocorre para a abordagem 1, com 20,15420dB, aproximadamente 0,56dB abaixo da abordagem 2, segunda implementação com melhor desempenho. Neste caso, o maior valor observado ocorreu para o modelo FSPL.

Repetindo o padrão ocorrido para o banco de dados 2, uma comparação entre os valores de $\sigma_S$ (dB) ressalta o modelo FSPL como o mais bem colocado, com o menor valor obtido de 4,32157dB. O registro mais elevado, desta vez pertence ao modelo de Egli. Comparando-se as abordagens de tratamento de dados de entrada de altura representativa de *clutter*, para o modelo P.1812, percebe-se uma elevação de aproximadamente 0,96dB, com a adoção da abordagem 2, tendo como referência a abordagem 1, indicando aumento do grau de dispersão dos dados, similarmente como ocorreu com o banco de dados 2.

O valor de $\Delta_{médio}$ (dB), por sua vez, foi positivo (> 0) ao adotar a abordagem 2, tendo como referência a abordagem 1. Como foi registrado para o banco de dados 2, esses testes indicam uma elevação da separação média (em dB), entre previsto e medido, ao se substituir a abordagem 1 pela abordagem 2. É importante destacar, no entanto, que somente houve um enlace (nº 5), cujo $\Delta$ (dB) $\neq 0$, ou seja, no qual houve alteração de seu valor de $S_i$ (dB). Para os demais enlaces, os resultados individuais de Δ (dB) são nulos.

Levando em consideração estes resultados, observou-se, mais uma vez, destaque da abordagem 1 em comparação com a abordagem 2, para a análise de $\sigma_S$ (dB) e $\Delta_{médio}$ (dB). A análise dos valores de Δ (dB) evidencia, no entanto, que ambas as abordagens possuem iguais resultados de $S_i$ (dB), por enlace, para todos os casos, com exceção do último enlace, como pode ser visto ao se comparar os valores presentes na Tabela 10.

## 4.5 – Conclusões da análise

Tomando os resultados numéricos dos parâmetros finais de análise como referência, conclui-se que a abordagem 2 é a que melhor prevê a perda de caminho, para o cenário do banco de dados 1. Por outro lado, para os bancos de dados 2 e 3, a situação se inverte, tendo a abordagem 1 como a de melhor desempenho. Supõe-se, aqui, a possibilidade de que essas conclusões possam ser generalizadas para cenários equivalentes aos apresentados nos três bancos de dados aqui abordados, no que tange à cobertura do solo e características do perfil de terreno, havendo ainda a necessidade de realização de generalização, quanto a outros cenários, para fins de corroboração.

Torna-se evidente, no entanto, o compromisso latente entre o grau de complexidade da escolha da abordagem e o seu desempenho. Soluções mais complexas podem levar a resultados mais precisos, mas não tão mais precisos, a ponto de compensar pelo tempo e os gastos adicionais necessários para sua realização. Em determinadas circunstâncias, uma solução mais simples e menos precisa pode ser adequada, por necessitar de menos tempo e dinheiro para ser implementada, ao passo que leva a resultados semelhantes aos da solução complexa, ao menos para a maioria das situações, atingindo um resultado julgado satisfatório pelo projetista/analista.

Assim ocorre com ambas as abordagens aqui implementadas para o modelo de propagação ITU-R P.1812. Para o banco de dados 1, a abordagem 2 ressalta-se por seus resultados positivos, tanto no que diz respeito ao grau de dispersão dos dados, quanto para os valores médios. Por outro lado, para os bancos de dados 2 e 3, é a abordagem 1 que se apresenta como a de melhor desempenho, para os mesmos parâmetros. No entanto, para esses dois últimos cenários, a melhora com o uso da abordagem 1, no quesito de grau de dispersão ($\sigma_S$), em momento algum chega à marca de 1dB ou ultrapassa-o (seu maior valor é, aproximadamente, 0,96dB). Já a maior elevação da separação média, ao adotar a abordagem 2 no lugar da abordagem 1, ou seja, o maior valor de $\Delta_{médio} > 0$ (dB), atinge aproximadamente 1,3dB, valor muito inferior aos 2,07dB de redução da separação média, obtido com uso da abordagem 2 nos testes do banco de dados 1. Ademais, para ambos os cenários em que a abordagem 1 apresenta resultados favoráveis, uma análise mais minuciosa, quanto aos valores individuais de $\Delta$ (dB) exprime que ambas as abordagens, nestas circunstâncias, obtêm resultados iguais, para a grande maioria dos enlaces: para o banco de dados 2, somente 1/3 de todos os enlaces possui algum tipo de alteração na separação individual (dB), ao se variar a abordagem implementada. Já para o banco de dados 3, 1/5 dos enlaces apresenta alteração na separação individual (dB). Logo, para estes ambientes específicos, há grande

similaridade de resultados, independentemente de qual abordagem é escolhida. Com base nestes elementos e considerando que tais comportamentos tendam a se repetir, para cenários semelhantes aos apresentados nos bancos de dados 2 e 3, a escolha da abordagem de tratamento de dados de entrada de altura representativa de *clutter* dependerá do grau de criteriosidade do projetista, bem como dos recursos disponíveis.

Para ambientes cujas características topográficas e de cobertura do terreno correspondam às do banco de dados 2 ou do banco de dados 3, ao considerar ambas as abordagens, caso o projetista planeje estabelecer mais de um enlace na mesma região e entenda que as melhoras com o uso da abordagem 1, no que tange a grau de dispersão ($\sigma_S$) e $\Delta_{médio}$ (dB), compensam o tempo adicional e os eventuais custos à implementação da técnica de obtenção dos dados associada (i.e. combustível para testes em campo, pessoal, *software* com nível de resolução superior ao encontrado em implementações gratuitas, etc.), e se tais recursos puderem ser alocados para a atividade, poderá ser empregada tal abordagem. Se, no entanto, tal empreendimento não puder ser realizado, ou julgar-se não compensar pelos benefícios do uso da abordagem 1, poderá ser empregada a abordagem 2, sem prejuízos de precisão, comparativamente, para a maioria dos enlaces, e com menos recursos necessários para a sua realização, desde que, nos enlaces em questão, seja possível discernir a cobertura do solo predominante, por inspeção visual, seja ela *in loco*, ou via *software*. Adicionalmente, na ocasião em que o tempo de projeto seja fator limitante, particularmente para estudos onde uma grande quantidade de pontos no perfil ao longo do enlace seja considerada, a abordagem 2 também se apresenta como uma solução atraente, por conta de sua simplicidade e similaridade dos resultados para ambas as abordagens, conforme supracitado.

## 4.6 – A escolha do modelo P.1812-5, em face da nova versão P.1812-6

Como visto nas seções anteriores, o modelo ITU-R P.1812-5 foi o implementado para todos os testes realizados até então. No entanto, ele não é a versão mais recente da recomendação, uma vez que foi consolidada uma nova documentação, no ano de 2022. Esta seção apresenta os testes que foram realizados, bem como sua análise e conclusões, visando justificar a escolha do modelo P.1812-5, no texto em lide.

Diferentemente de sua 5ª versão, capaz de trabalhar até 3GHz, o modelo ITU-R P.1812-6 apresenta um método que estende essa faixa para até 6GHz, o que eleva o seu número de aplicações, embora essa característica não tenha grande efeito, positivo ou negativo, quanto à

aplicabilidade com a abordagem LoRa, tendo em vista que a faixa de frequência utilizada por essa tecnologia é muito inferior.

Após comparação entre as documentações de ambas as versões, foram observadas as seguintes modificações, com o lançamento da versão mais recente do modelo de propagação:

(a) Não leva em consideração as alturas representativas de *clutter*, para os terminais, apenas nos pontos do perfil de terreno entre Tx e Rx;
(b) Modifica a tabela de alturas representativas *default* de *clutter*, de modo a excluir as alturas representativas para os pontos do perfil referentes aos terminais Tx e Rx;
(c) Exclusão do efeito das perdas adicionais devidas aos arredores dos terminais; e
(d) Alteração da formulação da distância entre terminais, para perda devida à propagação no espaço-livre.

Tais alterações, com ênfase nos itens (a) e (b), justificam uma análise comparativa entre a última atualização do modelo e sua predecessora, com o objetivo de nortear a escolha da mais apropriada. Os dados, advindos da fase de testes dos modelos, foram obtidos para todos os bancos de dados considerados, para a abordagem 1 e para a abordagem 2.

Semelhantemente ao realizado nas seções anteriores, os dados obtidos de cada um dos enlaces referem-se à separação individual (em dB), entre o valor da perda de caminho prevista pelo modelo P.1812 e o valor médio obtido das informações de campo da campanha de medição do banco de dados em questão.

De posse de todas as separações individuais de perda de caminho (dB), associadas aos testes com as duas versões do modelo P.1812, obtêm-se, por sua vez, para cada enlace, um valor $\Delta$, ou seja, a diferença entre a separação de perda de caminho para P.1812-6 e a separação para P.1812-5. Valores negativos de $\Delta$ indicam que, para aquele enlace específico, o modelo P.1812-6 apresenta um resultado mais próximo do valor medido, em relação ao resultado do modelo P.1812-5. Por outro lado, valores positivos de $\Delta$ indicam o oposto, ou seja, resultados melhores para a versão P.1812-5.

Após esse procedimento ser realizado para todos os enlaces, os valores de $\Delta$ são somados e é realizada a média aritmética, obtendo-se $\Delta_{médio}$, indicativo de desempenho comparativo entre os dois modelos. Como descrito anteriormente neste capítulo, esse valor capta informações de todos os enlaces testados, ao computar cada um dos $\Delta$ obtidos. Caso seja negativo, indica que, em média, há uma redução da separação (dB), quando utilizado o modelo P.1812-6, tendo como referência o modelo P.1812-5. Entretanto, caso seja positivo, é indicação que, em média, há elevação da separação (dB), quando utilizado o modelo P.1812-6, ou seja, o comportamento médio é de afastamento maior, do valor previsto, em relação ao medido.

Outro parâmetro de análise adotado para a comparação entre as versões do modelo foi o desvio padrão $\sigma_S$ (dB), que quantifica o grau de dispersão dos dados de separação individual (dB). Elevação de $\sigma_S$ (dB) com o uso do ITU-R P.1812-6, tendo como referência o P.1812-5, indica aumento da disparidade dos dados. Logicamente, uma redução do valor é indicativa de queda desta disparidade.

### 4.6.1 – ITU-R P.1812-5 e ITU-R P.1812-6: teste com banco de dados 1

Como indicado na seção 4.2, o banco de dados 1 não informa o tipo de polarização utilizada durante a campanha de medição. Desta forma, os testes para esses dados de entrada foram realizados empregando polarizações horizontal e vertical, conforme preconizado pela recomendação ITU-R P.1812. A análise, usando ambas as polarizações, permite determinar se há, ou não, alterações nas conclusões desta subseção, com a variação desse parâmetro.

As Tabelas 11 e 12 apresentam, respectivamente, os resultados para emprego de polarização horizontal e vertical. Nelas, a primeira coluna representa o código do referido enlace, analogamente ao apresentado na Figura 4. Os enlaces são exibidos, de cima para baixo, em ordem crescente de distância Tx-Rx. A segunda e a terceira colunas, por sua vez, apresentam os valores das separações entre valor previsto e valor medido (dB), para cada enlace, e a quarta coluna mostra os resultados $\Delta$ individuais. Ambos os testes foram realizados utilizando a abordagem 1 de tratamento de dados de entrada de *clutter*.

**Tabela 11** – Comparação das duas versões da P.1812: banco de dados 1, abordagem 1, pol. horiz.

| Abordagem 1 (polarização horizontal) | | | |
|---|---|---|---|
| **Nº do Enlace** | **P.1812-5 (y)** | **P.1812-6 (x)** | **Δ = x - y (dB)** |
| 2-1 | 21,76954 | 13,22967 | -8,53987 |
| 1-3 | 8,54825 | 34,50993 | 25,96168 |
| 2-3 | 3,18914 | 29,12103 | 25,93189 |
| 3-4 | 0,97347 | 24,37772 | 23,40425 |
| 12-13 | 10,21125 | 20,48198 | 10,27073 |
| 17-11 | 6,77576 | 12,42525 | 5,64949 |
| 12-11 | 3,69302 | 20,30581 | 16,61279 |
| 1-4 | 6,28118 | 17,82720 | 11,54602 |
| 5-7 | 6,30691 | 29,23238 | 22,92547 |
| 2-4 | 1,04585 | 30,25628 | 29,21043 |
| 17-14 | 12,50863 | 1,47802 | -11,03061 |
| 7-18 | 3,73739 | 18,77996 | 15,04257 |
| 4-7 | 0,88990 | 24,56460 | 23,67470 |
| 17-12 | 14,02364 | 25,56300 | 11,53936 |
| 12-10 | 18,27674 | 1,00560 | -17,27114 |
| 17-13 | 13,23596 | 27,56755 | 14,33159 |
| 12-14 | 5,40163 | 16,85967 | 11,45804 |
| 7-19 | 15,41886 | 26,39439 | 10,97553 |
| 5-18 | 1,24014 | 27,20184 | 25,96170 |
| 4-18 | 15,72757 | 1,69884 | -14,02873 |
| 5-19 | 14,71345 | 1,30976 | -13,40369 |
| 4-19 | 26,83605 | 1,58778 | -25,24827 |
| 5-8 | 1,76549 | 23,97797 | 22,21248 |
| 4-8 | 26,01646 | 0,34426 | -25,67220 |
| 7-9 | 0,75395 | 14,56173 | 13,80778 |
| 4-9 | 16,30253 | 0,73713 | -15,56540 |
| 5-9 | 13,03865 | 4,23214 | -8,80651 |
| 12-15 | 6,68103 | 21,45616 | 14,77513 |
| 17-16 | 9,26228 | 1,20521 | -8,05707 |
| 12-16 | 4,12116 | 13,90214 | 9,78098 |
| **σ_s (dB) =** | **7,46585** | **11,08606** | |
| **Δ médio (dB) =** | | | **6,581637** |

**Tabela 12** – Comparação das duas versões da P.1812: banco de dados 1, abordagem 1, pol. vert.

| Abordagem 1 (polarização vertical) | | | |
|---|---|---|---|
| **Nº do Enlace** | **P.1812-5 (y)** | **P.1812-6 (x)** | **Δ = x - y (dB)** |
| 2-1 | 21,76954 | 13,22967 | -8,53987 |
| 1-3 | 8,54825 | 34,50993 | 25,96168 |
| 2-3 | 3,18914 | 29,11693 | 25,92779 |
| 3-4 | 0,97347 | 24,32879 | 23,35532 |
| 12-13 | 10,21125 | 20,43492 | 10,22367 |
| 17-11 | 6,77576 | 12,38562 | 5,60986 |
| 12-11 | 3,69302 | 20,26011 | 16,56709 |
| 1-4 | 6,28118 | 17,78230 | 11,50112 |
| 5-7 | 6,30691 | 29,21153 | 22,90462 |
| 2-4 | 1,04585 | 30,20350 | 29,15765 |
| 17-14 | 12,50863 | 1,47802 | -11,03061 |
| 7-18 | 3,73739 | 18,74882 | 15,01143 |
| 4-7 | 0,88990 | 24,53613 | 23,64623 |
| 17-12 | 14,02364 | 25,52038 | 11,49674 |
| 12-10 | 18,27674 | 1,00295 | -17,27379 |
| 17-13 | 13,23596 | 27,53311 | 14,29715 |
| 12-14 | 5,40163 | 16,85967 | 11,45804 |
| 7-19 | 15,41886 | 26,35926 | 10,94040 |
| 5-18 | 1,24014 | 27,20184 | 25,96170 |
| 4-18 | 15,72757 | 1,69884 | -14,02873 |
| 5-19 | 14,71345 | 1,30410 | -13,40935 |
| 4-19 | 26,83605 | 1,58778 | -25,24827 |
| 5-8 | 1,76549 | 23,97797 | 22,21248 |
| 4-8 | 26,01646 | 0,34426 | -25,67220 |
| 7-9 | 0,75395 | 14,54032 | 13,78637 |
| 4-9 | 16,30253 | 0,73713 | -15,56540 |
| 5-9 | 13,03865 | 4,23214 | -8,80651 |
| 12-15 | 6,68103 | 21,45616 | 14,77513 |
| 17-16 | 9,26228 | 1,20521 | -8,05707 |
| 12-16 | 4,12116 | 13,90214 | 9,78098 |
| **σ_s (dB) =** | **7,46585** | **11,07648** | |
| **Δ médio (dB) =** | | | **6,564788** |

Como pode ser visto na Tabela 11, que retrata o caso para polarização horizontal, a maioria dos enlaces observa uma piora, na predição, quando se utiliza a versão P.1812-6, uma vez que 20 dos 30 enlaces possuem um valor positivo de Δ. Ademais, o valor de $\Delta_{médio}$ também é positivo, indicando que há uma elevação da separação média (dB) com o uso da 6ª versão, tendo como referência o uso da 5ª e, portanto, em média, um afastamento do previsto (modelo de propagação) em relação ao medido (campanha de medição). Por fim, ressalta-se a elevação ocorrida para $\sigma_S$ (dB), de cerca de 3,6dB, ao adotar-se o ITU-R P.1812-6, acompanhando assim, um aumento no grau de dispersão de $S_i$ (dB). O mesmo comportamento se repete, com mínimas modificações, na Tabela 12, que retrata o caso para polarização vertical.

Observa-se, também, que em ambas as circunstâncias, mantêm-se inalterados os valores de separação individual (dB), para o modelo P.1812-5, havendo alteração somente para a coluna referente ao modelo P.1812-6, quando modificada a modalidade de polarização.

Semelhantemente aos dados supracitados, as Tabelas 13 e 14 apresentam, para a abordagem 2 (método uniforme padrão) de tratamento de dados de entrada de *clutter*, respectivamente, os resultados utilizando polarizações horizontal e vertical, seguindo o formato das duas anteriores.

**Tabela 13** – Comparação das duas versões da P.1812: banco de dados 1, abordagem 2, pol. horiz.

| Abordagem 2 (polarização horizontal) | | | |
|---|---|---|---|
| **Nº do Enlace** | **P.1812-5 (y)** | **P.1812-6 (x)** | **Δ = x - y (dB)** |
| 2-1 | 21,76954 | 13,23000 | -8,53954 |
| 1-3 | 8,54825 | 34,51000 | 25,96175 |
| 2-3 | 3,18914 | 29,12100 | 25,93186 |
| 3-4 | 0,97347 | 24,37800 | 23,40453 |
| 12-13 | 10,21125 | 20,48200 | 10,27075 |
| 17-11 | 6,77576 | 12,42500 | 5,64924 |
| 12-11 | 3,69302 | 20,30600 | 16,61298 |
| 1-4 | 6,28118 | 17,82700 | 11,54582 |
| 5-7 | 6,30691 | 29,23200 | 22,92509 |
| 2-4 | 1,04585 | 30,25600 | 29,21015 |
| 17-14 | 12,65471 | 29,94500 | 17,29029 |
| 7-18 | 3,73739 | 18,78000 | 15,04261 |
| 4-7 | 0,88990 | 24,56500 | 23,67510 |
| 17-12 | 14,02364 | 25,56300 | 11,53936 |
| 12-10 | 23,32093 | 32,66900 | 9,34807 |
| 17-13 | 13,23596 | 27,56800 | 14,33204 |
| 12-14 | 15,11216 | 35,02900 | 19,91684 |
| 7-19 | 15,41886 | 26,39400 | 10,97514 |
| 5-18 | 1,24014 | 27,20200 | 25,96186 |
| 4-18 | 13,16351 | 21,83800 | 8,67449 |
| 5-19 | 0,28673 | 21,78200 | 21,49527 |
| 4-19 | 5,67434 | 29,32800 | 23,65366 |
| 5-8 | 1,76549 | 23,97800 | 22,21251 |
| 4-8 | 0,54137 | 32,69600 | 32,15463 |
| 7-9 | 0,75395 | 14,56200 | 13,80805 |
| 4-9 | 16,30253 | 18,70000 | 2,39747 |
| 5-9 | 1,86904 | 26,57200 | 24,70296 |
| 12-15 | 6,68103 | 32,64300 | 25,96197 |
| 17-16 | 3,40062 | 22,56000 | 19,15938 |
| 12-16 | 7,75415 | 33,71600 | 25,96185 |
| **σ_s (dB) =** | **6,54890** | **6,34928** | |
| **Δ médio (dB) =** | | | **17,707873** |

**Tabela 14** – Comparação das duas versões da P.1812: banco de dados 1, abordagem 2, pol. vert.

| Abordagem 2 (polarização vertical) | | | |
|---|---|---|---|
| **Nº do Enlace** | **P.1812-5 (y)** | **P.1812-6 (x)** | **Δ = x - y (dB)** |
| 2-1 | 21,76954 | 13,23000 | -8,53954 |
| 1-3 | 8,54825 | 34,51000 | 25,96175 |
| 2-3 | 3,18914 | 29,11700 | 25,92786 |
| 3-4 | 0,97347 | 24,32900 | 23,35553 |
| 12-13 | 10,21125 | 20,43500 | 10,22375 |
| 17-11 | 6,77576 | 12,38600 | 5,61024 |
| 12-11 | 3,69302 | 20,26000 | 16,56698 |
| 1-4 | 6,28118 | 17,78200 | 11,50082 |
| 5-7 | 6,30691 | 29,21200 | 22,90509 |
| 2-4 | 1,04585 | 30,20300 | 29,15715 |
| 17-14 | 12,65471 | 29,94500 | 17,29029 |
| 7-18 | 3,73739 | 18,74900 | 15,01161 |
| 4-7 | 0,88990 | 24,53600 | 23,64610 |
| 17-12 | 14,02364 | 25,52000 | 11,49636 |
| 12-10 | 23,32093 | 32,62700 | 9,30607 |
| 17-13 | 13,23596 | 27,53300 | 14,29704 |
| 12-14 | 15,11216 | 35,02900 | 19,91684 |
| 7-19 | 15,41886 | 26,35900 | 10,94014 |
| 5-18 | 1,24014 | 27,20200 | 25,96186 |
| 4-18 | 13,16351 | 21,83800 | 8,67449 |
| 5-19 | 0,28673 | 21,77600 | 21,48927 |
| 4-19 | 5,67434 | 29,32800 | 23,65366 |
| 5-8 | 1,76549 | 23,97800 | 22,21251 |
| 4-8 | 0,54137 | 32,69600 | 32,15463 |
| 7-9 | 0,75395 | 14,54000 | 13,78605 |
| 4-9 | 16,30253 | 18,70000 | 2,39747 |
| 5-9 | 1,86904 | 26,57200 | 24,70296 |
| 12-15 | 6,68103 | 32,64300 | 25,96197 |
| 17-16 | 3,40062 | 22,56000 | 19,15938 |
| 12-16 | 7,75415 | 33,71600 | 25,96185 |
| **σ_s (dB) =** | **6,54890** | **6,35476** | |
| **Δ médio (dB) =** | | | **17,689673** |

Para a abordagem 2, no que diz respeito à Tabela 13, para polarização horizontal, observa-se apenas um valor negativo de Δ, associado ao enlace 2-1, com menor distância Tx-Rx, em relação aos demais. Todos os outros enlaces, por outro lado, tiveram elevação na separação individual (dB), com máxima elevação em "4 – 8", no valor de 32,15463dB. Ademais, novamente obtêm-se $\Delta_{médio}$ positivo, desta vez com um valor muito superior, em comparação às Tabelas 11 e 12, refletindo que, a princípio, a versão P.1812-6 parece ter desempenho pior, em média, com referência ao modelo P.1812-5, principalmente com uso da abordagem 2, no que diz respeito a este parâmetro. Por outro lado, o valor de $\sigma_S$ (dB) experimentou um ligeira redução, de cerca de 0,2dB, com o uso do P.1812-6, apontando para diminuição do grau de dispersão dos dados. O mesmo comportamento pode ser visto na Tabela 14, onde, mais uma vez, a mudança no tipo de polarização não altera os valores de separação individual (dB) do P.1812-5, somente do P.1812-6. Mais uma vez, essa ligeira alteração não causa resultados altamente discrepantes e conduz às mesmas conclusões.

### 4.6.2 – ITU-R P.1812-5 e ITU-R P.1812-6: teste com banco de dados 2

O procedimento foi replicado para o cenário referente ao banco de dados 2. Como já ressaltado anteriormente, na seção 4.3 deste capítulo, a campanha realizada na Finlândia não cita a modalidade de polarização utilizada. Portanto, assim como o apresentado na subseção 4.4.1, os testes foram feitos para polarizações horizontal e vertical, com o objetivo de determinar se há alterações das conclusões obtidas, a depender da escolha da polarização, na execução das simulações.

A Tabela 15 explicita os resultados obtidos ao se comparar as duas versões mais recentes do modelo de propagação ITU-R P.1812, com utilização de polarização horizontal. Por outro lado, a Tabela 16 traz os dados advindos da replicação do mesmo processo, mas com a escolha de polarização vertical. Ambos os testes implementaram a abordagem 1 de tratamento de dados de entrada de *clutter*.

**Tabela 15** – Comparação das duas versões da P.1812: banco de dados 2, abordagem 1, pol. horiz.

| Abordagem 1 (polarização horizontal) | | | |
|---|---|---|---|
| **Nº do Enlace** | **P.1812-5 (y)** | **P.1812-6 (x)** | **Δ = x - y (dB)** |
| 5 | 9,95370 | 9,93130 | -0,02240 |
| 3 | 3,99640 | 2,88220 | -1,11420 |
| 4 | 4,56660 | 4,55130 | -0,01530 |
| 1 | 12,78240 | 12,77900 | -0,00340 |
| 7 | 17,10270 | 17,08940 | -0,01330 |
| 6 | 3,81570 | 3,32500 | -0,49070 |
| 8 | 27,64250 | 24,33430 | -3,30820 |
| 9 | 10,29280 | 10,28880 | -0,00400 |
| 2 | 2,07820 | 5,62550 | 3,54730 |
| **σ_s (dB) =** | **8,18190** | **7,13717** | |
| **Δ médio (dB) =** | | | **-0,15824** |

**Tabela 16** – Comparação das duas versões da P.1812: banco de dados 2, abordagem 1, pol.vert.

| Abordagem 1 (polarização vertical) | | | |
|---|---|---|---|
| **Nº do Enlace** | **P.1812-5 (y)** | **P.1812-6 (x)** | **Δ = x - y (dB)** |
| 5 | 9,95370 | 9,93130 | -0,02240 |
| 3 | 3,99640 | 2,88220 | -1,11420 |
| 4 | 4,56660 | 4,55130 | -0,01530 |
| 1 | 12,78240 | 12,77900 | -0,00340 |
| 7 | 17,10270 | 17,08940 | -0,01330 |
| 6 | 3,81570 | 3,32500 | -0,49070 |
| 8 | 27,64250 | 24,33430 | -3,30820 |
| 9 | 10,29280 | 10,28880 | -0,00400 |
| 2 | 2,07820 | 5,62550 | 3,54730 |
| **σ_s (dB) =** | **8,18190** | **7,13717** | |
| **Δ médio (dB) =** | | | **-0,15824** |

Como pode ser visto nas Tabelas 15 e 16, não foi observada qualquer alteração dos resultados obtidos, ao se variar a polarização, para a abordagem 1. Logo, todos os valores de Δ mostraram-se inalterados, bem como $\Delta_{médio}$. Ademais, diferentemente do que foi verificado para o banco de dados 1, há uma predominância de $\Delta < 0$, indicando que a maioria dos enlaces observou redução da separação (dB), quando utilizado P.1812-6, no lugar do P.1812-5. Além disso, o valor

final $\Delta_{médio}$ obtido também é negativo, indicativo que, em média, a 6ª versão do modelo aproxima-se do que foi medido, nessas circunstâncias. Quanto à análise de $\sigma_S$ (dB), é obtida uma redução de cerca de 1dB, com a adoção do P.1812-6, novamente apontando para redução no grau de dispersão.

Para finalizar a análise para o banco de dados 2, os testes foram repetidos, desta vez utilizando a abordagem 2. As Tabelas 17 e 18 apresentam os resultados para polarização horizontal e vertical, respectivamente.

**Tabela 17** – Comparação das duas versões da P.1812: banco de dados 2, abordagem 2, pol horiz.

| Abordagem 2 (polarização horizontal) | | | |
|---|---|---|---|
| **Nº do Enlace** | **P.1812-5 (y)** | **P.1812-6 (x)** | **Δ = x - y (dB)** |
| 5 | 13,73590 | 13,75831 | 0,02241 |
| 3 | 3,99640 | 2,88223 | -1,11417 |
| 4 | 19,58810 | 19,60336 | 0,01526 |
| 1 | 12,78240 | 12,77895 | -0,00345 |
| 7 | 17,10270 | 17,08939 | -0,01331 |
| 6 | 3,81570 | 3,32497 | -0,49073 |
| 8 | 27,64250 | 24,33431 | -3,30819 |
| 9 | 3,29390 | 3,29786 | 0,00396 |
| 2 | 2,07820 | 0,35014 | -1,72806 |
| **σ_s (dB) =** | **8,91251** | **8,63817** | |
| **Δ médio (dB) =** | | | **-0,73514** |

**Tabela 18** – Comparação das duas versões da P.1812: banco de dados 2, abordagem 2, pol vert.

| Abordagem 2 (polarização vertical) | | | |
|---|---|---|---|
| **Nº do Enlace** | **P.1812-5 (y)** | **P.1812-6 (x)** | **Δ = x - y (dB)** |
| 5 | 13,73590 | 13,75831 | 0,02241 |
| 3 | 3,99640 | 2,88223 | -1,11417 |
| 4 | 19,58810 | 19,60336 | 0,01526 |
| 1 | 12,78240 | 12,77895 | -0,00345 |
| 7 | 17,10270 | 17,08939 | -0,01331 |
| 6 | 3,81570 | 3,32497 | -0,49073 |
| 8 | 27,64250 | 24,33431 | -3,30819 |
| 9 | 3,29390 | 3,29786 | 0,00396 |
| 2 | 2,07820 | 0,35014 | -1,72806 |
| **σ_s (dB) =** | **8,91251** | **8,63817** | |
| **Δ médio (dB) =** | | | **-0,73514** |

Novamente, como pode ser observado nas Tabelas 17 e 18, não é detectada qualquer alteração dos resultados ao se modificar o tipo de polarização. Desta forma, os valores de Δ e $\Delta_{médio}$ também se mantêm os mesmos. Quanto aos resultados de Δ, é obtida uma preponderância de valores negativos que, no entanto, é menor que a observada para a abordagem 1, havendo agora três enlaces com Δ > 0, a saber: enlaces nº 5, 4 e 9. O valor de $\Delta_{médio}$ experimenta um resultado negativo menor que 1dB, enquanto o valor de $\sigma_S$ (dB) sofreu leve redução, de aproximadamente 0,27dB, ambos sutis indicativos de melhor desempenho da 6ª versão da P.1812.

### 4.6.3 – ITU-R P.1812-5 e ITU-R P.1812-6: teste com banco de dados 3

O banco de dados 3 é o único, dentre os três analisados nesta dissertação, que define o tipo de polarização utilizada na campanha de medição. Portanto, levando esse fator em consideração, a análise apenas se ateve à polarização vertical.

A Tabela 19 apresenta os referidos resultados para os 5 enlaces extraídos do banco de dados 3, com uso da abordagem 1. Nessa tabela, o número do enlace, de "1" a "5", diz respeito aos enlaces de 1000m a 5000m utilizados nesse banco de dados, em ordem crescente de distância Tx-Rx.

**Tabela 19** – Comparação das duas versões da P.1812: banco de dados 3, abordagem 1, pol. vert.

| Abordagem 1 (polarização vertical) | | | |
|---|---|---|---|
| **Nº do Enlace** | **P.1812-5 (y)** | **P.1812-6 (x)** | **Δ = x - y (dB)** |
| 1 | 19,7800 | 5,6830 | -14,0970 |
| 2 | 20,4550 | 15,3034 | -5,1516 |
| 3 | 13,0320 | 13,3967 | 0,3647 |
| 4 | 21,3940 | 41,1242 | 19,7302 |
| 5 | 26,1100 | 40,5773 | 14,4673 |
| **σ_s (dB) =** | **4,6895** | **16,4966** | |
| **Δ médio (dB) =** | | | **3,06272** |

Na Tabela 19, observa-se, desta vez, assim como no caso do banco de dados 1, uma preponderância de valores Δ > 0, bem como a obtenção de um $\Delta_{médio} > 0$. Disso decorre que, não somente há uma quantidade maior de enlaces que têm sua predição prejudicada, ao se trocar o modelo P.1812-5 pelo P.1812-6, mas também há indicativo de um afastamento, em média, do previsto em relação ao medido, ao se realizar a mesma troca. O valor de $\sigma_S$ (dB), por sua vez, experimentou uma elevação de aproximadamente 11,8dB com a utilização do modelo P.1812-6 no lugar do P.1812-5, evidenciando o aumento do grau de dispersão relacionado.

Por fim, a Tabela 20 explicita os resultados para o teste, usando também polarização vertical, com uso da abordagem 2.

**Tabela 20** – Comparação das duas versões da P.1812: banco de dados 3, abordagem 2, pol. vert.

| Abordagem 2 (polarização vertical) | | | |
|---|---|---|---|
| **Nº do Enlace** | **P.1812-5 (y)** | **P.1812-6 (x)** | **Δ = x - y (dB)** |
| 1 | 19,7800 | 42,1000 | 22,3200 |
| 2 | 20,4550 | 42,7920 | 22,3370 |
| 3 | 13,0320 | 35,3710 | 22,3390 |
| 4 | 21,3940 | 43,7350 | 22,3410 |
| 5 | 28,9230 | 47,2380 | 18,3150 |
| **σ_s (dB) =** | **5,6525** | **4,3221** | |
| **Δ médio (dB) =** | | | **21,53040** |

No caso apresentado na Tabela 20, observa-se um comportamento peculiar quando comparado ao restante dos testes realizados nesta seção. Desta vez, todos os enlaces, sem exceção, experimentam grande elevação da separação individual (dB) ao se utilizar o modelo P.1812-6 no lugar do P.1812-5, provocando, portanto, somente valores de $\Delta > 0$ e um elevado $\Delta_{médio} > 0$. Logo, para essas circunstâncias, têm-se, claramente, uma elevação da separação média (dB) com a troca da 5ª versão pela mais recente, ou seja, um afastamento do previsto em relação ao medido. Por outro lado, tal como também observado para os testes da abordagem 2 com o banco de dados 1, ocorre uma ligeira redução do valor de $\sigma_S$ (dB), de cerca de 1,33dB.

Adicionalmente, tratando da situação hipotética de utilização de polarização horizontal para esse banco de dados, o que não ocorreu de fato, novamente não se observa qualquer tipo de alteração nos resultados, sendo esses, também, indiferentes à modalidade de polarização escolhida.

Recapitulando todos os testes comparativos das duas versões do modelo ITU-R P.1812 nesta seção, ressaltam-se os seguintes pontos relevantes:

(a) Foram observados valores de $\Delta_{médio} > 0$ em 6 das 10 situações consideradas, com aparente melhora do estado global de previsão com uso da 5ª versão, com relação a este parâmetro;

(b) Somente 4 de 10 testes apresentaram valor $\Delta_{médio} < 0$, com aparente melhora do estado global de previsão com uso da 6ª versão, com relação a este parâmetro;

(c) Foram observados 3 testes com elevação de $\sigma_S$, com a utilização da 6ª versão, no lugar da 5ª versão. Os demais 7 testes observaram redução de $\sigma_S$;

(d) Sinais de melhora do desempenho com a adoção do P.1812-6, sejam eles em $\Delta_{médio}$ ou em $\sigma_S$, são consideravelmente mais sutis, em comparação com as pioras no desempenho, quando ocorrem, para os mesmos dois parâmetros. Ilustrando, a maior redução de $\sigma_S$ ocorrida com uso da 6ª versão é de 1,3304dB, aproximadamente 1/3 da menor elevação de $\sigma_S$ com uso dessa versão e 1/10 da maior elevação registrada. De forma semelhante, maior redução de $S_{média}$ com uso da 6ª versão é de 0,73514dB, aproximadamente ¼ da menor elevação de $S_{média}$ e 3/100 da maior elevação registrada; e

(e) Apenas se observou alteração do resultado, com modificação do tipo de polarização empregado, em 4 das 10 situações consideradas, todas elas referentes ao banco de dados 1. No entanto, nenhuma dessas alterações foi significativa, a ponto de alterar a condição de $\Delta_{médio}$ e $\sigma_S$ e modificar as conclusões.

Portanto, com base nos dados disponíveis, independentemente da polarização escolhida para teste, conclui-se que o modelo ITU-R P.1812-5 obtém melhor resultado para o parâmetro

$\Delta_{médio}$, enquanto o modelo ITU-R P.1812-6 obtém melhor desempenho para o parâmetro $\sigma_S$. Adicionando-se a isso os elementos do item (d), que evidenciam que as melhorias obtidas com a 6ª versão são muito inferiores às pioras no desempenho, quando ocorrem, no que tange a ambos os parâmetros, entende-se que ambas as versões apresentam prós e contras, mas que o uso do P.1812-6 não apresenta vantagens substanciais que justifiquem o sacrifício no desempenho, para a numerosa quantidade de cenários em que o modelo ITU-R P.1812-5 se sobressai, em $\Delta_{médio}$ e/ou $\sigma_S$. Esses dados, portanto, justificam a utilização da versão mais antiga para os testes apresentados e descritos nas seções 4.2, 4.3 e 4.4.

# 5. Considerações Finais

Esta dissertação estudou meios de provocar melhor aderência entre um modelo de propagação já existente e a tecnologia de comunicação de baixa potência LoRaWAN, de forma a reduzir os efeitos prejudiciais provocados pela adoção de modelos genéricos na predição de enlace, para tais redes. Para tal, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, cujos resultados são apresentados no capítulo 1. A partir de tais referências, foram identificadas duas lacunas a serem exploradas, para um novo trabalho científico: não foram identificados modelos de propagação desenvolvidos, capazes de tratar de diversos fenômenos de propagação distintos, e que ainda tenham sido testados para a faixa de 915MHz, utilizada em LoRaWAN no Brasil. Com base nessas informações adquiridas, foi elaborada a hipótese de que, adotando um modelo de propagação mais apropriado para a tecnologia em pauta e que atenda às lacunas, e ajustando-o, é possível se obter uma solução de precisão adequada para redes LoRaWAN.

No capítulo 2, foram apresentados, primeiramente, os conceitos básicos de modelos de propagação e suas classificações. Em seguida, foi descrita a metodologia de comparação de modelos de propagação, com base em parâmetros típicos. O objetivo foi determinar quais métodos eram os mais adequados para uso com a tecnologia LoRaWAN. A partir desse processo, foram obtidas duas soluções, os modelos ITU-R P.1812 e Egli, cujas características principais foram lá elencadas.

O capítulo 3, por sua vez, foi reservado para a metodologia adotada na realização dos testes e na análise subsequente. Foi apresentada a estratégia de extração e comparação dos resultados, bem como as ferramentas utilizadas. Aqui, o modelo selecionado ITU-R P.1812 foi salientado como o principal, para o desenvolvimento do estudo e teste da hipótese, por conta de sua compatibilidade inicial com redes LoRaWAN, bem como o atendimento às lacunas indicadas no capítulo 1. O modelo de Egli foi escolhido como método auxiliar, cujas comparações com o modelo da ITU permitiriam recolhimento de informação complementar relevante. Como apresentado nesse capítulo, a implementação do modelo ITU-R P.1812, frente à análise da hipótese, envolve sua modificação, por meio da implementação de duas abordagens de tratamento de dados de entrada de altura representativa de *clutter*: a abordagem 1, que faz análise de cobertura do solo, individualmente, de cada um dos pontos que compõem o vetor distância entre Tx e Rx, se caracterizando como um processo de aquisição de dados com potencial para detecção de variações sutis da cobertura do solo; e a abordagem 2, que generaliza as características do ambiente pelo qual percorre o enlace, ao adotar a cobertura do solo predominante como a que mais tem efeito

nos resultados, definindo assim um único valor de altura representativa de *clutter* para todos os pontos entre Tx e Rx e, comumente, simplificando o processo. O estudo de ambas as abordagens, para diferentes cenários LoRa, permite a coleta de informações relacionadas ao seu desempenho. Também foram descritas as características principais de cada banco de dados utilizado, bem como a estrutura geral do código Octave elaborado para realização dos testes e sob ambas as abordagens do modelo P.1812 supracitadas, ressaltando suas diferenças.

O capítulo 4 apresentou e discutiu os resultados dos testes. Nele, para os três bancos de dados, são exibidas as simulações e os valores finais dos parâmetros de análise $\Delta_{médio}$, $\sigma_S$ e $S_{média}$, com implementação das duas abordagens de tratamento de dados de entrada de altura representativa de *clutter*. Para os bancos de dados nos quais não era certo o tipo de polarização implementada, testes foram realizados para as duas modalidades previstas pela recomendação ITU-R P.1812. Por questões comparativas, foram coletados os dados referentes ao modelo de Egli, bem como os dados associados ao modelo do espaço livre (FSPL), este último somente exibido como referência otimista de perda de caminho. Não foram detectadas quaisquer alterações, provocadas pela variação da modalidade de polarização, para os testes entre abordagens, nos bancos de dados. Os resultados da análise, à primeira vista, expõem vantagens para uso da abordagem 1 em cenários cujas características de cobertura do solo e perfil de terreno se assemelham aos apresentados para os bancos de dados 2 e 3, enquanto o uso da abordagem 2, mais simples que a anterior, ficaria reservada para ambientes rurais, com características menos complexas de cobertura do solo, semelhantes ao banco de dados 1. No entanto, é ressaltado que, para os bancos de dados 2 e 3, não há, de fato, uma melhora significativa no grau de dispersão dos valores ($\sigma_S$) ou em $\Delta_{médio}$, por conta da adoção da abordagem 1, tendo como referência a abordagem 2. O texto, então, analisa os valores individuais de $\Delta$, para os bancos de dados 2 e 3, concluindo a grande similaridade dos resultados de separação individual (dB), com uso de ambas as abordagens. Estes elementos permitiram concluir que a escolha entre uma ou outra estratégia de tratamento de dados de *clutter* dependerá do grau de criteriosidade do projetista, bem como dos recursos disponíveis (financeiros e tempo de execução). O capítulo 4 é finalizado com uma seção reservada à comparação entre as duas versões mais recentes do modelo ITU-R P.1812, no que tange aos mesmos parâmetros de análise anteriormente utilizados e adotando os mesmos bancos de dados. Os resultados evidenciam que sua 6ª versão apresenta melhoras em desempenho diminutas, em comparação com seus resultados negativos, quando ocorrem, fator que contribuiu para a escolha da 5ª versão como padrão, durante a realização dos testes desta dissertação.

Tendo como base os resultados obtidos, pode-se elencar as seguintes contribuições específicas desta dissertação:

(a) Determinados dois modelos de propagação (ITU-R P.1812 e Egli) compatíveis com predição de perdas de caminho em redes LoRaWAN;
(b) Dados comparativos entre ITU-R P.1812 e Egli, para diferentes cenários;
(c) Dados de comportamento do modelo ITU-R P.1812 para cenários no Brasil (bancos de dados 1 e 3);
(d) Introduzidas duas abordagens de tratamento de dados de entrada de altura representativa de *clutter*; e
(e) Informações que possam contribuir na escolha da melhor abordagem de dados de *clutter*, dependendo do projeto a ser empregado.

Como sugestão de trabalhos futuros, a primeira é a repetição da metodologia para cenários semelhantes aos aqui abordados, nos três bancos de dados, com o objetivo de confirmar a generalidade das conclusões. Uma segunda sugestão é a elaboração de novas abordagens para melhor aproximar o modelo de propagação de Egli aos valores médios de medição, em cenários LoRaWAN. Ademais, sugere-se um estudo de adequação do modelo ITU-R P.1812 com outras tecnologias LPWAN, objetivando obter versões alternativas para previsão apropriada de perda de caminho dessas soluções. Por fim, faz-se desejável avaliar o impacto direto do efeito das perdas devidas ao *clutter* nos terminais, focando na importância de sua modelagem e inclusão em modelos de propagação, para diferentes faixas de frequência e tecnologias.

# Referências Bibliográficas

3GPP – 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT. **Study on Channel Model for Frequencies from 0.5 to 100 GHz**, TR 38901 v17.0.0 Release 17, Valbonne, 2022.

AIHARA, N. *et al.* Generalized Interference Detection Scheme in Heterogeneous Low Power Wide Area Networks. **IEEE Sensors Letters**, v. 4, n. 6, p. 1 – 4, 2020.

AJOSE, S. O.; IMOIZE, A. L. Propagation measurements and modelling at 1800 MHz in Lagos Nigeria. **International Journal of Wireless and Mobile Computing**, v. 6, n. 2, p. 165-174, 2013.

BARIZON, B. H. M. **Medidas de Propagação em 2.4 GHz para o Planejamento de Redes Locais de Acesso sem fio**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BERTOLDO, S. *et al.* Empirical indoor propagation models for LoRa radio link in an office environment. *In*: EUROPEAN CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION (EuCAP), 13., 2019, Krakow. Krakow: IEEE, 2019. p. 1 – 5.

BIANCO, G. M. *et al.* LoRa System for Search and Rescue: Path-Loss Models and Procedures in Mountain Scenarios. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 8, n. 3, p. 1985 – 1999, 2020.

BRASIL. Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). **Plano de atribuição, destinação e distribuição de faixas de frequências no Brasil**. 2019. 201 p.

BUENO, H. O. **Otimização da Seleção de Parâmetros de Transmissão de Rede LORA Mesh de Gateway Single Channel em Ambientes Rurais**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de Uberlândia, Uberlândia.

CAVALCANTI, J. F. B. **Medidas de Rádio Propagação em UHF em Ambientes Suburbanos para TV Digital: Estudo de Cobertura para Recepção Fixa**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CHALL, R. E.; LAHOULD, S.; HELOU, M. E. LoRaWAN Network: Radio Propagation Models and Performance Evaluation in Various Environments in Lebanon. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 6, n. 2, p. 2366 – 2378, 2019.

DELISLE, G. Y. *et al*. Propagation loss prediction: A comparative study with application to the mobile radio channel. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 34, n. 2, p. 86-96, 1985.

DIENG, O.; PHAM, C.; THIARE, O. Comparing and Adapting Propagation Models for LoRa Networks. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS AND MOBILE

COMPUTING, NETWORKING AND COMMUNICATIONS (WiMob), 16., 2020, Thessaloniki. Thessaloniki: IEEE, 2020. p. 1 – 7.

EGLI, J. J. Radio Propagation Above 40 MC Over Irregular Terrain. **Proceedings of IRE**, v. 45, n. 10, p. 1383 – 1391, 1957.

ERUNKULU, O. O. *et al.* Cellular Communications Coverage Prediction Techniques: A Survey and Comparison. **IEEE Access**, v. 8, p. 113052 – 113077, 2020.

EUROPEAN COMISSION, DIRECTORATE-GENERAL FOR THE INFORMATION SOCIETY AND MEDIA. **COST Action 231: Digital mobile radio towards future generation systems**: Final Report. Luxembourg: European Communities, 1999.

FRIIS, Harald T. A note on a simple transmission formula. **Proceedings of the IRE**, v. 34, n. 5, p. 254-256, 1946.

HATA, M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. **IEEE transactions on Vehicular Technology**, v. 29, n. 3, p. 317-325, 1980.

HOSSEINZADEH, S. *et al.* A Neural Network Propagation Model for LoRaWAN and Critical Analysis with Real-World Measurements. **Big Data Cognitive Computing**, v. 1, n. 1, p. 7, 2017.

ITU-R - INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION RADIOCOMMUNICATION SECTOR. **Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Short-Range Outdoor Radiocommunication Systems and Radio Local Area Networks in the Frequency Range 300MHz to 10GHz**, ITU-R P.1411-11, Geneva, 2021.

ITU-R – INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION RADIOCOMMUNICATION SECTOR. **A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands**, ITU-R P.1812-5, Geneva, 2019.

ITU-R – INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION RADIOCOMMUNICATION SECTOR. **A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the frequency range 30MHz to 6000MHz**, ITU-R P.1812-6, Geneva, 2022.

ITU-R – INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION RADIOCOMMUNICATION SECTOR. **Software, Data and Validation examples for ionospheric and tropospheric radio wave propagation and radio noise**, 2023. Disponível em: <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg3/Pages/iono-tropo-spheric.aspx?View=%25257B36b3168f-af49-4c95-9854-34a89b02bb35%25257D&SortField=Topic&SortDir=Asc>. Acesso em: 26 mar. 2023.

KALLIOVAARA, J. *et al*. Suitability of ITU-R P.1546 Propagation Predictions for Allocating

LTE SDL with GE06. *In*: 2017 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON BROADBAND MULTIMEDIA SYSTEMS AND BROADCASTING (BMSB), 2017, Cagliari. Cagliari: IEEE, 2017. p. 1 – 6.

KEYSIGHT. Low Power Wide Area Network (LPWAN) Technologies: **Benefits and test challenges**, 2020.

KLAINA, H. *et al.* Aggregator to Electric Vehicle LoRaWAN Based Communication Analysis in Vehicle-to-Grid Systems in Smart Cities. **IEEE Access**, v. 8, p. 124688 – 124701, 2020.

LAM, K.; CHEUNG, C.; LEE, W. RSSI-Based LoRa Localization Systems for Large-Scale Indoor and Outdoor Environments. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 68, n. 12, p. 11778 – 11791, 2019.

LIU, B. H. *et al.* The impact of fading and shadowing on the network performance of wireless sensor networks. **International Journal of Sensor Networks**. January 2008.

LIYA, M. L.; ARJUN, D. A survey of LPWAN technology in agricultural field. *In*: 2020 FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON I-SMAC (IoT In Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC). IEEE, 2020. p. 313-317.

MARQUEZ, L. E. *et al.* On the Use of LoRaWAN in Smart Cities: A Study With Blocking Interference. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 7, n. 4, p. 2806 – 2815, 2019.

OCTAVE. *About*, 2022a. Disponível em: <https://octave.org/about>. Acesso em: 30 dez. 2022.

OCTAVE. Script Files. *In*: OCTAVE. *GNU Octave (version 7.3.0)*. 2022b. Disponível em: <https://docs.octave.org/latest/Script-Files.html>. Acesso em: 30 dez. 2022.

ORTIZ, F. M.; CRUZ, P.; COUTO, R. S.; COSTA, L. H. Caracterização de uma Rede Sem-fio de Baixa Potência e Longo Alcance para Internet das Coisas. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS (SBRC), 36., 2018, Campos do Jordão. **Anais** [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2018. p. 1159-1172. ISSN 2177-9384. DOI: https://doi.org/10.5753/sbrc.2018.2485.

ORTIZ, F. M.; ALMEIDA, T. T.; FERREIRA, A. E.; COSTA, L. H. Caracterização de Desempenho de uma Rede LoRa em Ambientes Urbanos: Simulação vs. Prática. *In*: WORKSHOP DE COMPUTAÇÃO URBANA (COURB), 3., 2019, Gramado. **Anais** [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2019. p. 167-180. ISSN 2595-2706. DOI: https://doi.org/10.5753/courb.2019.7476.

PEREIRA, M. A. B. **Análise de modelos de propagação na área urbana da região de Curitiba**

**– PR na faixa de frequência de 1800MHz**. 2007. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica com Ênfase em Telecomunicações) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

PERSIA, S.; CARCIOFI, C.; FACCIOLI, M. NB-IoT and LoRA Connectivity Analysis for M2M/IoT Smart Grids Applications. *In*: AEIT INTERNATIONAL ANNUAL CONFERENCE, 2017, Cagliari. Cagliari: IEEE, 2017. p. 1 – 6.

QADIR, Q. M. Analysis of the Reliability of LoRa. **IEEE Communications Letters**, v. 25, n. 3, p. 1037 – 1040, 2020.

RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Low Power Wide Area Networks: An Overview. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 19, n. 2, p. 855 – 873, 2017.

REZENDE, M. H. B. **Estudo e Análise de Propagação de Sinais de RF na Faixa de Ondas Centimétricas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de São João del-Rei e Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), São João del-Rei.

SANTOS, B. P. *et al.* Internet das Coisas: da Teoria à Prática. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS, 34., 2016, Salvador.

SEYBOLD, J. S. **Introduction to RF propagation**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. 349 p.

SILVA *et al*. LoRaWAN — A low power WAN protocol for Internet of Things: A review and opportunities. *In*: INTERNATIONAL MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON COMPUTER AND ENERGY SCIENCE, 2017. p. 1 – 6.

SINHA, R. S.; WEI, Y.; HWANG, S. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. **ICT Express**, v. 3, p. 14 – 21, Mar, 2017.

STUSEK, M. *et al.* Accuracy Assessment and Cross-Validation of LPWAN Propagation Models in Urban Scenarios. **IEEE Access**, v. 8, p. 154625 – 154636, 2020.

# Apêndice I

## Códigos Octave implementados para teste do banco de dados 1 adotados no Capítulo 4

Todos os códigos desenvolvidos para a análise do Capítulo 4 seguem o formato geral descrito na seção 3.3 do Capítulo 3. Os códigos aqui apresentados são aqueles relativos à realização dos testes para o banco de dados 1, que se difere dos demais por determinar os valores médios de perda de caminho, a partir dos valores das amostras, disponibilizadas no banco de dados, e por exibir a plotagem das amostras.

### ABORDAGEM 1:

```
clc, clear all, format short

%ALUNO: BRYAN DA SILVA DUARTE
%
%ESTE SCRIPT DETERMINA AS PERDAS DE CAMINHO (PL) PREVISTAS PARA DIFERENTES ENLACES
%EM UM MESMO CANAL.
%MODELOS DE PROPAGAÇÃO UTILIZADOS:
%MODELO EGLI, MODELO DO ESPAÇO-LIVRE, MODELO ITU-R P.1812-5 (ABORDAGEM 1)

%BANCO DE DADOS 1

%----------------------------------DADOS DE ENTRADA---------------------------------------

f = 915; %frequência em MHz
TxRx = [0.115 0.183 0.256 0.442 0.508 0.551 0.561 0.573 0.651 0.679 0.906 0.917 ...
1.089 1.109 1.123 1.277 1.300 1.373 1.394 1.548 1.755 1.777 1.877 1.992 2.027 ...
2.246 2.335 2.352 3.546 3.750]; %vetor com as distâncias Tx-Rx referentes a cada enlace
%analisado, em km -> 2-1, 1-3, 2-3, 3-4, 12-13, 17-11, 12-11, 1-4, 5-7, 2-4, 17-14,
%7-18, 4-7, 17-12, 12-10, 17-13, 12-14, 7-19, 5-18, 4-18, 5-19, 4-19, 5-8, 4-8, 7-9,
%4-9, 5-9, 12-15, 17-16, 12-16

TxRx_log = 10*log10(TxRx/0.1);

% Dados de campanha de medição
PL_m1 = [85 85 88.125 88.125 86.25 86.25 86.875 86.875 83.75 85]; %valores medidos de PL (Enlace 2-1)
x_link1 = TxRx(1)*ones(1,length(PL_m1));
x_link1 = 10*log10(x_link1/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos
```

```
%de PL (Enlace 2-1)
PL_m2 = [120 110 105 115.625 114.375 110.625 108.75 106.25 103.75 120]; %valores medidos de PL (Enlace 1-3)
x_link2 = TxRx(2)*ones(1,length(PL_m2));
x_link2 = 10*log10(x_link2/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos
%de PL (Enlace 1-3)
PL_m3 = [110 113.75 114.375 111.875 110.625 107.8125 110 113.75 114.375 110]; %valores medidos de PL (Enlace 2-3)
x_link3 = TxRx(3)*ones(1,length(PL_m3));
x_link3 = 10*log10(x_link3/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos
%de PL (Enlace 2-3)
PL_m4 = [120 118.75 117.8125 113.75 115.625 120.9375 121.875 128.75 128.125 120]; %valores medidos de PL (Enlace 3-4)
x_link4 = TxRx(4)*ones(1,length(PL_m4));
x_link4 = 10*log10(x_link4/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos
%de PL (Enlace 3-4)
PL_m5 = [120 125 121.875 120.9375 118.75 123.125 123.75 124.0625 122.1875 120]; %valores medidos de PL (Enlace 12-13)
x_link5 = TxRx(5)*ones(1,length(PL_m5));
x_link5 = 10*log10(x_link5/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos
%de PL (Enlace 12-13)
PL_m6 = [106.875 105 105.625 105.9375 106.875 105 105 105.625 105.9375 105]; %valores medidos de PL (Enlace 17-11)
x_link6 = TxRx(6)*ones(1,length(PL_m6));
x_link6 = 10*log10(x_link6/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos
%de PL (Enlace 17-11)
PL_m7 = [117.8125 115.625 115.9375 114.375 117.8125 115.625 115.9375 114.375 117.8125 117.8125]; %valores medidos de PL (Enlace 12-
11)
x_link7 = TxRx(7)*ones(1,length(PL_m7));
x_link7 = 10*log10(x_link7/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos
%de PL (Enlace 12-11)
PL_m8 = [117.8125 115.625 115.9375 114.375 113.75 117.8125 115.625 115.9375 114.375 114.375]; %valores medidos de PL (Enlace 1-4)
x_link8 = TxRx(8)*ones(1,length(PL_m8));
x_link8 = 10*log10(x_link8/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos
%de PL (Enlace 1-4)
PL_m9 = [120 115.625 117.8125 118.75 120.9375 122.1875 123.125 123.75 120 120]; %valores medidos de PL (Enlace 5-7)
x_link9 = TxRx(9)*ones(1,length(PL_m9));
x_link9 = 10*log10(x_link9/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos
%de PL (Enlace 5-7)
PL_m10 = [125 129.0625 125.9375 126.875 128.125 135 131.875 136.25 136.875 138.125]; %valores medidos de PL (Enlace 2-4)
x_link10 = TxRx(10)*ones(1,length(PL_m10));
x_link10 = 10*log10(x_link10/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos
%de PL (Enlace 2-4)
PL_m11 = [130 130.9375 128.75 127.8125 129.6875 130 130.9375 128.75 127.8125 129.6875]; %valores medidos de PL (Enlace 17-14)
x_link11 = TxRx(11)*ones(1,length(PL_m11));
x_link11 = 10*log10(x_link11/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos
%de PL (Enlace 17-14)
PL_m12 = [122.1875 120.9375 120 122.1875 120.9375 120 120 120 120 120]; %valores medidos de PL (Enlace 7-18)
```

```
x_link12 = TxRx(12)*ones(1,length(PL_m12));

x_link12 = 10*log10(x_link12/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos

%de PL (Enlace 7-18)

PL_m13 = [129.6875 129.0625 127.8125 126.875 127.1875 125 125.9375 123.75 125 125]; %valores medidos de PL (Enlace 4-7)

x_link13 = TxRx(13)*ones(1,length(PL_m13));

x_link13 = 10*log10(x_link13/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos

%de PL (Enlace 4-7)

PL_m14 = [129.6875 129.0625 130.9375 131.875 133.125 136.25 136.875 139.0625 129.6875 129.0625]; %valores medidos de PL (Enlace 17-
12)

x_link14 = TxRx(14)*ones(1,length(PL_m14));

x_link14 = 10*log10(x_link14/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos

%de PL (Enlace 17-12)

PL_m15 = [140 136.875 139.0625 149.375 148.125 143.125 142.1875 140.9375 140 140]; %valores medidos de PL (Enlace 12-10)

x_link15 = TxRx(15)*ones(1,length(PL_m15));

x_link15 = 10*log10(x_link15/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos

%de PL (Enlace 12-10)

PL_m16 = [136.25 135 130.9375 129.6875 129.0625 127.8125 136.25 135 135 135]; %valores medidos de PL (Enlace 17-13)

x_link16 = TxRx(16)*ones(1,length(PL_m16));

x_link16 = 10*log10(x_link16/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos

%de PL (Enlace 17-13)

PL_m17 = [133.125 131.875 134.0625 135 136.25 136.875 138.125 135 135 135]; %valores medidos de PL (Enlace 12-14)

x_link17 = TxRx(17)*ones(1,length(PL_m17));

x_link17 = 10*log10(x_link17/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos

%de PL (Enlace 12-14)

PL_m18 = [142.1875 138.125 136.875 135 133.125 131.875 130.9375 129.6875 142.1875 138.125]; %valores medidos de PL (Enlace 7-19)

x_link18 = TxRx(18)*ones(1,length(PL_m18));

x_link18 = 10*log10(x_link18/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos

%de PL (Enlace 7-19)

PL_m19 = [123.75 122.1875 122.96875 121.09375 120 118.75 123.75 122.1875 122.96875 120]; %valores medidos de PL (Enlace 5-18)

x_link19 = TxRx(19)*ones(1,length(PL_m19));

x_link19 = 10*log10(x_link19/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos

%de PL (Enlace 5-18)

PL_m20 = [120 118.75 117.8125 115.625 114.375 120 118.75 117.8125 115.625 114.375]; %valores medidos de PL (Enlace 4-18)

x_link20 = TxRx(20)*ones(1,length(PL_m20));

x_link20 = 10*log10(x_link20/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos

%de PL (Enlace 4-18)

PL_m21 = [123.75 122.96875 122.1875 123.75 122.96875 122.1875 122.96875 122.1875 122.96875 122.1875]; %valores medidos de PL (Enlace
5-19)

x_link21 = TxRx(21)*ones(1,length(PL_m21));

x_link21 = 10*log10(x_link21/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos

%de PL (Enlace 5-19)

PL_m22 = [127.8125 126.875 125.9375 125 123.75 127.8125 126.875 125.9375 125 125]; %valores medidos de PL (Enlace 4-19)

x_link22 = TxRx(22)*ones(1,length(PL_m22));

x_link22 = 10*log10(x_link22/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos
```

```
%de PL (Enlace 4-19)
PL_m23 = [123.75 125 125 125 125 125 125 125 125 125]; %valores medidos de PL (Enlace 5-8)
x_link23 = TxRx(23)*ones(1,length(PL_m23));
x_link23 = 10*log10(x_link23/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos
%de PL (Enlace 5-8)
PL_m24 = [129.6875 130.9375 131.875 133.125 135 129.6875 130.9375 131.875 133.125 135]; %valores medidos de PL (Enlace 4-8)
x_link24 = TxRx(24)*ones(1,length(PL_m24));
x_link24 = 10*log10(x_link24/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos
%de PL (Enlace 4-8)
PL_m25 = [125.9375 125 123.75 122.96875 125.9375 125 123.75 122.96875 125 125]; %valores medidos de PL (Enlace 7-9)
x_link25 = TxRx(25)*ones(1,length(PL_m25));
x_link25 = 10*log10(x_link25/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos
%de PL (Enlace 7-9)
PL_m26 = [118.75 117.8125 116.5625 115.625 118.75 117.8125 116.5625 115.625 118.75 117.8125]; %valores medidos de PL (Enlace 4-9)
x_link26 = TxRx(26)*ones(1,length(PL_m26));
x_link26 = 10*log10(x_link26/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos
%de PL (Enlace 4-9)
PL_m27 = [128.75 127.8125 126.875 125.9375 125 128.75 127.8125 126.875 125.9375 125]; %valores medidos de PL (Enlace 5-9)
x_link27 = TxRx(27)*ones(1,length(PL_m27));
x_link27 = 10*log10(x_link27/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos
%de PL (Enlace 5-9)
PL_m28 = [129.6875 130.9375 131.875 133.125 129.6875 130.9375 131.875 133.125 133.125 133.125]; %valores medidos de PL (Enlace 12-15)
x_link28 = TxRx(28)*ones(1,length(PL_m28));
x_link28 = 10*log10(x_link28/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos
%de PL (Enlace 12-15)
PL_m29 = [127.8125 126.875 125.9375 125 123.75 122.96875 125 125 125 125]; %valores medidos de PL (Enlace 17-16)
x_link29 = TxRx(29)*ones(1,length(PL_m29));
x_link29 = 10*log10(x_link29/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos
%de PL (Enlace 17-16)
PL_m30 = [139.0625 138.125 136.25 135 134.0625 130.9375 131.875 133.125 144.0625 146.25]; %valores medidos de PL (Enlace 12-16)
x_link30 = TxRx(30)*ones(1,length(PL_m30));
x_link30 = 10*log10(x_link30/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos
%de PL (Enlace 12-16)



PL_m = [PL_m1; PL_m2; PL_m3; PL_m4; PL_m5; PL_m6; PL_m7; PL_m8; PL_m9; PL_m10; PL_m11; ...
PL_m12; PL_m13; PL_m14; PL_m15; PL_m16; PL_m17; PL_m18; PL_m19; PL_m20; PL_m21; PL_m22; ...
PL_m23; PL_m24; PL_m25; PL_m26; PL_m27; PL_m28; PL_m29; PL_m30];

x_link = [x_link1; x_link2; x_link3; x_link4; x_link5; x_link6; x_link7; x_link8; x_link9; ...
x_link10; x_link11; x_link12; x_link13; x_link14; x_link15; x_link16; x_link17; x_link18; ...
x_link19; x_link20; x_link21; x_link22; x_link23; x_link24; x_link25; x_link26; x_link27; ...
x_link28; x_link29; x_link30]; %matriz com vetores de distância dos enlaces em 10*log10(d/d0)
```

```
%Dados de entrada Modelo de Egli
hb_e = 2.5*ones(1, 30);
hm_e = 2.5*ones(1, 30);

%Dados de entrada Modelo ITU-R P.1812-5
p = 50; %porcentagem não excedida
f_ghz = f/1000; %frequência em GHz

passo = []; %passo dos vetores de distância dos pontos do perfil
n = 30; %número de pontos considerados no perfil de terreno
a = 0;
for a = 1:length(TxRx)
  passo(a) = TxRx(a)/(n-1);
endfor

d1 = [0:passo(1):TxRx(1)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 2-1)
d2 = [0:passo(2):TxRx(2)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 1-3)
d3 = [0:passo(3):TxRx(3)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 2-3)
d4 = [0:passo(4):TxRx(4)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 3-4)
d5 = [0:passo(5):TxRx(5)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 12-%13)
d6 = [0:passo(6):TxRx(6)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 17-%11)
d7 = [0:passo(7):TxRx(7)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 12-%11)
d8 = [0:passo(8):TxRx(8)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 1-4)
d9 = [0:passo(9):TxRx(9)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 5-7)
d10 = [0:passo(10):TxRx(10)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 2-%4)
d11 = [0:passo(11):TxRx(11)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace %17-14)
d12 = [0:passo(12):TxRx(12)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 7-%18)
d13 = [0:passo(13):TxRx(13)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 4-%7)
d14 = [0:passo(14):TxRx(14)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace %17-12)
d15 = [0:passo(15):TxRx(15)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace %12-10)
d16 = [0:passo(16):TxRx(16)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace %17-13)
d17 = [0:passo(17):TxRx(17)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace %12-14)
d18 = [0:passo(18):TxRx(18)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 7-%19)
d19 = [0:passo(19):TxRx(19)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 5-%18)
d20 = [0:passo(20):TxRx(20)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 4-%18)
d21 = [0:passo(21):TxRx(21)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 5-%19)
d22 = [0:passo(22):TxRx(22)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 4-%19)
d23 = [0:passo(23):TxRx(23)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 5-%8)
d24 = [0:passo(24):TxRx(24)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 4-%8)
d25 = [0:passo(25):TxRx(25)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 7-%9)
d26 = [0:passo(26):TxRx(26)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 4-%9)
d27 = [0:passo(27):TxRx(27)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 5-%9)
```

```
d28 = [0:passo(28):TxRx(28)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace %12-15)
d29 = [0:passo(29):TxRx(29)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace %17-16)
d30 = [0:passo(30):TxRx(30)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace %12-16)

d = [d1; d2; d3; d4; d5; d6; d7; d8; d9; d10; d11; d12; d13; d14; d15; d16; d17; ...
d18; d19; d20; d21; d22; d23; d24; d25; d26; d27; d28; d29; d30];

h1 = [528 528 528 528 529 529 529 529 529 529 529 529 530 530 530 530 530 530 ...
530 530 530 531 531 531 531 531 531 531 531 531]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 2-1)
h2 = [531 531 531 531 531 531 531 531 531 531 531 531 530 530 530 530 530 530 ...
530 530 530 530 530 530 530 531 531 531 530 530]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 1-3)
h3 = [528 528 528 528 529 529 529 529 529 529 529 529 529 529 529 529 529 529 ...
529 529 530 530 530 530 530 530 530 530 530 530]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 2-3)
h4 = [530 531 531 531 532 532 533 533 534 534 534 535 535 536 536 537 537 537 ...
538 538 538 539 539 539 539 539 539 539 540 540]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 3-4)
h5 = [585 586 586 587 588 589 589 590 591 591 592 592 593 593 593 593 593 593 ...
593 593 594 594 594 594 595 595 596 596 596 597]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 12-13)
h6 = [556 556 557 557 558 558 558 559 560 560 561 562 562 563 564 564 565 565 ...
566 566 567 568 568 569 569 570 570 571 571 572]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 17-11)
h7 = [585 585 585 584 584 583 583 582 582 582 581 581 580 580 579 579 578 578 ...
577 576 576 575 575 575 574 574 573 572 572 572]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 12-11)
h8 = [531 531 531 531 531 532 532 533 533 534 534 535 535 536 536 536 537 537 ...
538 538 538 538 539 539 539 539 539 539 539 540]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 1-4)
h9 = [548 547 547 547 547 547 547 547 547 547 547 547 548 548 548 548 548 548 548 ...
548 548 548 548 549 549 549 549 550 550 550 550]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 5-7)
h10 = [528 529 529 530 530 530 530 531 531 531 532 532 533 534 534 535 535 536 ...
537 537 537 538 538 538 539 539 539 539 539 540]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 2-4)
h11 = [556 556 556 555 556 556 556 555 555 554 553 553 552 551 551 550 548 546 ...
545 544 543 543 544 544 545 546 547 547 548 550]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 17-14)
h12 = [550 550 551 551 551 551 550 550 550 550 550 550 550 551 551 552 552 552 ...
553 553 554 554 555 554 554 554 544 554 555 555]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 7-18)
```

```
h13 = [540 541 542 542 542 542 541 541 541 541 542 542 543 543 543 544 544 545 ...
545 544 544 544 545 546 548 548 549 549 550 550]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 4-7)
h14 = [556 557 558 558 560 561 562 564 565 566 567 568 569 570 571 572 573 574 ...
575 576 577 578 579 580 581 582 583 583 584 585]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 17-12)
h15 = [585 584 583 582 581 580 579 577 576 574 573 572 570 568 567 565 564 562 ...
561 560 558 557 556 555 553 552 551 550 547 546]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 12-10)
h16 = [556 557 558 559 561 562 564 566 567 569 570 571 572 574 575 577 578 580 ...
581 582 584 585 587 588 590 591 592 593 594 597]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 17-13)
h17 = [585 584 583 582 580 579 577 574 572 570 569 568 567 564 561 559 557 555 ...
554 553 551 550 549 549 550 550 550 550 550 550]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 12-14)
h18 = [550 550 550 550 549 548 548 549 549 550 551 551 551 551 551 551 551 551 ...
551 551 551 550 550 550 550 551 551 551 550 550]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 7-19)
h19 = [548 546 546 545 545 545 545 544 543 543 544 545 544 543 543 544 545 546 ...
547 548 549 550 550 551 551 552 552 553 554 555]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 5-18)
h20 = [540 540 539 539 539 539 539 539 538 537 537 538 539 539 538 538 539 541 ...
542 543 544 545 547 548 549 550 551 552 553 554]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 4-18)
h21 = [548 546 545 545 545 544 544 543 545 545 544 542 541 541 542 543 543 545 ...
545 546 546 547 547 547 548 548 549 550 550 550]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 5-19)
h22 = [540 539 538 538 538 538 537 536 535 534 532 529 526 525 528 532 536 538 ...
540 542 543 543 544 544 545 545 547 548 549 550]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 4-19)
h23 = [548 546 545 545 545 544 543 543 545 544 543 543 544 545 547 548 550 550 ...
550 551 552 553 554 556 556 556 557 558 559 560]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 5-8)
h24 = [540 540 539 539 539 538 538 537 536 535 534 533 534 537 540 542 543 545 ...
546 547 548 550 550 551 553 554 556 558 559 560]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 4-8)
h25 = [550 550 550 548 548 548 549 550 550 550 549 550 549 549 549 548 548 548 ...
547 547 547 547 547 547 546 546 547 547 548 550]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 7-9)
h26 = [540 539 537 537 537 535 533 530 527 524 521 522 526 530 532 533 534 536 ...
537 537 538 539 540 541 541 542 544 545 547 550]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 4-9)
h27 = [548 545 545 544 543 542 543 545 541 538 537 538 539 541 542 542 542 542 ...
```

```
541 542 542 544 544 544 544 544 545 546 547 550]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 5-9)
h28 = [585 583 581 576 571 567 563 563 561 559 559 560 565 568 568 566 567 568 ...
569 571 573 574 573 574 575 574 573 574 576 577]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 12-15)
h29 = [556 555 554 551 548 543 542 544 547 548 549 552 553 558 560 561 563 564 ...
566 567 567 565 565 572 578 582 588 593 598 604]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 17-16)
h30 = [585 582 575 567 565 563 559 562 568 568 568 570 573 575 575 576 575 577 ...
578 583 580 576 572 571 578 585 589 595 598 605]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 12-16)

h = [h1; h2; h3; h4; h5; h6; h7; h8; h9; h10; h11; h12; h13; h14; h15; h16; h17; ...
h18; h19; h20; h21; h22; h23; h24; h25; h26; h27; h28; h29; h30];

R1 = [15 0*ones(1,length(d1)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada ponto %do perfil em 'm' (enlace 2-1)
R2 = [10 0*ones(1,length(d2)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada ponto %do perfil em 'm' (enlace 1-3)
R3 = [15 0*ones(1,length(d3)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada ponto %do perfil em 'm' (enlace 2-3)
R4 = [10 0*ones(1,length(d4)-2) 15];  %altura do clutter representativo para cada ponto %do perfil em 'm' (enlace 3-4)
R5 = [10 0*ones(1,length(d5)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada ponto %do perfil em 'm' (enlace 12-13)
R6 = [10 0*ones(1,length(d6)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada ponto %do perfil em 'm' (enlace 17-11)
R7 = [10 0*ones(1,length(d7)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada ponto %do perfil em 'm' (enlace 12-11)
R8 = [10 0*ones(1,length(d8)-2) 15];  %altura do clutter representativo para cada ponto %do perfil em 'm' (enlace 1-4)
R9 = [10 0*ones(1,length(d9)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada ponto %do perfil em 'm' (enlace 5-7)
R10 = [15 0*ones(1,length(d10)-2) 15];  %altura do clutter representativo para cada ponto %do perfil em 'm' (enlace 2-4)
R11 = [10 0*ones(1,10) 15 0*ones(1,length(d11)-20) 15 15 0 0 15 15 0 10];  %altura do %clutter representativo para cada ponto do perfil em 'm' (enlace 17-14)
R12 = [10 0*ones(1,length(d12)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada ponto %do perfil em 'm' (enlace 7-18)
R13 = [15 0*ones(1,length(d13)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada ponto %do perfil em 'm' (enlace 4-7)
R14 = [10 0*ones(1,length(d14)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada ponto %do perfil em 'm' (enlace 17-12)
R15 = [10 15 0 0 15 0*ones(1,length(d15)-8) 15 0 10];  %altura do clutter representativo %para cada ponto do perfil em 'm' (enlace 12-10)
R16 = [10 0*ones(1,length(d16)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada ponto %do perfil em 'm' (enlace 17-13)
R17 = [10 0*ones(1,length(d17)-12) 15*ones(1,6) 0 0 0 0 10];  %altura do clutter %representativo para cada ponto do perfil em 'm' (enlace 12-14)
R18 = [10 0*ones(1,length(d18)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada ponto %do perfil em 'm' (enlace 7-19)
R19 = [10 0*ones(1,length(d19)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada ponto %do perfil em 'm' (enlace 5-18)
R20 = [15 0*ones(1,12) 15 15 0*ones(1,length(d20)-16) 10];  %altura do clutter %representativo para cada ponto do perfil em 'm' (enlace 4-18)
R21 = [10 0*ones(1,7) 15 15 15 0*ones(1,length(d21)-12) 10];  %altura do clutter %representativo para cada ponto do perfil em 'm' (enlace 5-19)
R22 = [15 0*ones(1,length(d22)-4) 15 0 10];  %altura do clutter representativo para cada %ponto do perfil em 'm' (enlace 4-19)
R23 = [10 0*ones(1,length(d23)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada ponto %do perfil em 'm' (enlace 5-8)
R24 = [15 0*ones(1,9) 15 0*ones(1,length(d24)-14) 15 15 10];  %altura do clutter %representativo para cada ponto do perfil em 'm' (enlace 4-8)
R25 = [10 0*ones(1,length(d25)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada ponto %do perfil em 'm' (enlace 7-9)
R26 = [15 0*ones(1,5) 15 0 15 0*ones(1,length(d26)-10) 10];  %altura do clutter %representativo para cada ponto do perfil em 'm' (enlace 4-9)
R27 = [10 0*ones(1,6) 15 0*ones(1,length(d27)-9) 10];  %altura do clutter representativo %para cada ponto do perfil em 'm' (enlace 5-9)
```

R28 = [10 0*ones(1,4) 15*ones(1,9) 0*ones(1,length(d28)-15) 10];  %altura do clutter %representativo para cada ponto do perfil em 'm' (enlace 12-15)

R29 = [10 0*ones(1,4) 15 15 0*ones(1,14) 15 15 0*ones(1,length(d29)-26) 15 0 10];  %altura do clutter representativo para cada ponto do perfil em 'm' (enlace 17-16)

R30 = [10 0 0 15*ones(1,6) 0*ones(1,10) 15 0*ones(1,3) 15 0*ones(1,length(d30)-27) 15 0 10];  %altura do clutter representativo para cada ponto do perfil em 'm' (enlace 12-16)

R = [R1; R2; R3; R4; R5; R6; R7; R8; R9; R10; R11; R12; R13; R14; R15; R16; R17; ...

R18; R19; R20; R21; R22; R23; R24; R25; R26; R27; R28; R29; R30];

Ct1 = [4 2*ones(1,length(d1)-1)]; %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea %(1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 2-1)

Ct2 = 2*ones(1,length(d2)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 1-3)

Ct3 = [4 2*ones(1,length(d3)-1)]; %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea %(1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 2-3)

Ct4 = [2*ones(1,length(d4)-1) 4]; %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea %(1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 3-4)

Ct5 = 2*ones(1,length(d5)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 12-13)

Ct6 = 2*ones(1,length(d6)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 17-11)

Ct7 = 2*ones(1,length(d7)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 12-11)

Ct8 = [2*ones(1,length(d8)-1) 4]; %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea %(1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 1-4)

Ct9 = 2*ones(1,length(d9)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 5-7)

Ct10 = [4 2*ones(1,length(d10)-2) 4]; %tipo de clutter para cada ponto do perfil: %Water/sea (1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 2-4)

Ct11 = [2*ones(1,11) 4 2*ones(1,length(d11)-20) 4 4 2 2 4 4 2 2] ; %tipo de clutter para %cada ponto do perfil: Water/sea (1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest %(4), Dense urban (5). (Enlace 17-14)

Ct12 = 2*ones(1,length(d12)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 7-18)

Ct13 = [4 2*ones(1,length(d13)-1)]; %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea %(1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 4-7)

Ct14 = 2*ones(1,length(d14)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 17-12)

Ct15 = [2 4 2 2 4 2*ones(1,length(d15)-8) 4 2 2]; %tipo de clutter para cada ponto do %perfil: Water/sea (1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban %(5). (Enlace 12-10)

Ct16 = 2*ones(1,length(d16)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 17-13)

Ct17 = [2*ones(1,length(d17)-11) 4*ones(1,6) 2*ones(1,5)]; %tipo de clutter para cada %ponto do perfil: Water/sea (1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), %Dense urban (5). (Enlace 12-14)

Ct18 = 2*ones(1,length(d18)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 7-19)

Ct19 = 2*ones(1,length(d19)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 5-18)

Ct20 = [4 2*ones(1,12) 4 4 2*ones(1,length(d20)-15)]; %tipo de clutter para cada ponto %do perfil: Water/sea (1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense %urban (5). (Enlace 4-18)

Ct21 = [2*ones(1,8) 4 4 4 2*ones(1,length(d21)-11)]; %tipo de clutter para cada ponto %do perfil: Water/sea (1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense %urban (5). (Enlace 5-19)

Ct22 = [4 2*ones(1,length(d22)-4) 4 2 2]; %tipo de clutter para cada ponto do perfil: %Water/sea (1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). %(Enlace 4-19)

Ct23 = 2*ones(1,length(d23)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 5-8)

Ct24 = [4 2*ones(1,9) 4 2*ones(1,length(d24)-14) 4 4 2]; %tipo de clutter para cada ponto %do perfil: Water/sea (1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense %urban (5). (Enlace 4-8)

Ct25 = 2*ones(1,length(d25)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 7-9)

Ct26 = [4 2*ones(1,5) 4 2 4 2*ones(1,length(d26)-9)]; %tipo de clutter para cada ponto %do perfil: Water/sea (1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense %urban (5). (Enlace 4-9)

Ct27 = [2*ones(1,7) 4 2*ones(1,length(d27)-8)]; %tipo de clutter para cada ponto do %perfil: Water/sea (1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban %(5). (Enlace 5-9)

Ct28 = [2*ones(1,5) 4*ones(1,9) 2*ones(1,length(d28)-14)]; %tipo de clutter para cada %ponto do perfil: Water/sea (1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), %Dense urban (5). (Enlace 12-15)

Ct29 = [2*ones(1,5) 4 4 2*ones(1,14) 4 4 2*ones(1,length(d29)-26) 4 2 2]; %tipo de %clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), Open/rural (2), Suburban (3), %Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 17-16)

Ct30 = [2 2 2 4*ones(1,6) 2*ones(1,10) 4 2*ones(1,3) 4 2*ones(1,length(d30)-27) 4 2 2]; %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), Open/rural (2), Suburban (3), %Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 12-16)

Ct = [Ct1; Ct2; Ct3; Ct4; Ct5; Ct6; Ct7; Ct8; Ct9; Ct10; Ct11; Ct12; Ct13; Ct14; ...

Ct15; Ct16; Ct17; Ct18; Ct19; Ct20; Ct21; Ct22; Ct23; Ct24; Ct25; Ct26; Ct27; Ct28; Ct29; Ct30];

zone1 = 4*ones(1,length(d1)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),

%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 2-1)

zone2 = 4*ones(1,length(d2)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),

%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 1-3)

zone3 = 4*ones(1,length(d3)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),

%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 2-3)

zone4 = 4*ones(1,length(d4)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),

%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 3-4)

zone5 = 4*ones(1,length(d5)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),

%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 12-13)

zone6 = 4*ones(1,length(d6)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),

%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 17-11)

zone7 = 4*ones(1,length(d7)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),

%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 12-11)

zone8 = 4*ones(1,length(d8)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),

%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 1-4)

zone9 = 4*ones(1,length(d9)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),

%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 5-7)

zone10 = 4*ones(1,length(d10)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),

%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 2-4)

zone11 = 4*ones(1,length(d11)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),

%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 17-14)

zone12 = 4*ones(1,length(d12)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),

%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 7-18)

```
zone13 = 4*ones(1,length(d13)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),
%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 4-7)
zone14 = 4*ones(1,length(d14)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),
%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 17-12)
zone15 = 4*ones(1,length(d15)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),
%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 12-10)
zone16 = 4*ones(1,length(d16)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),
%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 17-13)
zone17 = 4*ones(1,length(d17)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),
%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 12-14)
zone18 = 4*ones(1,length(d18)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),
%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 7-19)
zone19 = 4*ones(1,length(d19)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),
%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 5-18)
zone20 = 4*ones(1,length(d20)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),
%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 4-18)
zone21 = 4*ones(1,length(d21)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),
%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 5-19)
zone22 = 4*ones(1,length(d22)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),
%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 4-19)
zone23 = 4*ones(1,length(d23)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),
%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 5-8)
zone24 = 4*ones(1,length(d24)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),
%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 4-8)
zone25 = 4*ones(1,length(d25)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),
%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 7-9)
zone26 = 4*ones(1,length(d26)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),
%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 4-9)
zone27 = 4*ones(1,length(d27)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),
%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 5-9)
zone28 = 4*ones(1,length(d28)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),
%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 12-15)
zone29 = 4*ones(1,length(d29)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),
%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 17-16)
zone30 = 4*ones(1,length(d30)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4),
%Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 12-16)

zone = [zone1; zone2; zone3; zone4; zone5; zone6; zone7; zone8; zone9; zone10; ...
zone11; zone12; zone13; zone14; zone15; zone16; zone17; zone18; zone19; zone20; ...
zone21; zone22; zone23; zone24; zone25; zone26; zone27; zone28; zone29; zone30];

htg = 2.5; %altura do Tx, em relação ao solo
hrg = 2.5; %altura do Rx, em relação ao solo
```

```
phi_1 = -18.471614; %latitude ponto 1
lam_1 = -49.019156; %longitude ponto 1
phi_2 = -18.471906; %latitude ponto 2
lam_2 = -49.020203; %longitude ponto 2
phi_3 = -18.472800; %latitude ponto 3
lam_3 = -49.017964; %longitude ponto 3
phi_4 = -18.472444; %latitude ponto 4
lam_4 = -49.013800; %longitude ponto 4
phi_5 = -18.474361; %latitude ponto 5
lam_5 = -49.008839; %longitude ponto 5
phi_6 = -18.475028; %latitude ponto 6
lam_6 = -49.007594; %longitude ponto 6
phi_7 = -18.471458; %latitude ponto 7
lam_7 = -49.003517; %longitude ponto 7
phi_8 = -18.459161; %latitude ponto 8
lam_8 = -49.001069; %longitude ponto 8
phi_9 = -18.453383; %latitude ponto 9
lam_9 = -49.006558; %longitude ponto 9
phi_10 = -18.485211; %latitude ponto 10
lam_10 = -49.008033; %longitude ponto 10
phi_11 = -18.484289; %latitude ponto 11
lam_11 = -49.001303; %longitude ponto 11
phi_12 = -18.488128; %latitude ponto 12
lam_12 = -48.997839; %longitude ponto 12
phi_13 = -18.485328; %latitude ponto 13
lam_13 = -48.994028; %longitude ponto 13
phi_14 = -18.487733; %latitude ponto 14
lam_14 = -49.010156; %longitude ponto 14
phi_15 = -18.496831; %latitude ponto 15
lam_15 = -49.018158; %longitude ponto 15
phi_16 = -18.502800; %latitude ponto 16
lam_16 = -49.029856; %longitude ponto 16
phi_17 = -18.481031; %latitude ponto 17
lam_17 = -49.005242; %longitude ponto 17
phi_18 = -18.463239; %latitude ponto 18
lam_18 = -49.002758; %longitude ponto 18
phi_19 = -18.459100; %latitude ponto 19
lam_19 = -49.004461; %longitude ponto 19

phi_t = [phi_2; phi_1; phi_2; phi_3; phi_12; phi_17; phi_12; phi_1; phi_5; phi_2; ...
 phi_17; phi_7; phi_4; phi_17; phi_12; phi_17; phi_12; phi_7; phi_5; phi_4; phi_5; ...
 phi_4; phi_5; phi_4; phi_7; phi_4; phi_5; phi_12; phi_17; phi_12];
```

```
lam_t = [lam_2; lam_1; lam_2; lam_3; lam_12; lam_17; lam_12; lam_1; lam_5; lam_2; ...
lam_17; lam_7; lam_4; lam_17; lam_12; lam_17; lam_12; lam_7; lam_5; lam_4; lam_5; ...
lam_4; lam_5; lam_4; lam_7; lam_4; lam_5; lam_12; lam_17; lam_12];

phi_r = [phi_1; phi_3; phi_3; phi_4; phi_13; phi_11; phi_11; phi_4; phi_7; phi_4; ...
phi_14; phi_18; phi_7; phi_12; phi_10; phi_13; phi_14; phi_19; phi_18; phi_18; ...
phi_19; phi_19; phi_8; phi_8; phi_9; phi_9; phi_9; phi_15; phi_16; phi_16];

lam_r = [lam_1; lam_3; lam_3; lam_4; lam_13; lam_11; lam_11; lam_4; lam_7; lam_4; ...
lam_14; lam_18; lam_7; lam_12; lam_10; lam_13; lam_14; lam_19; lam_18; lam_18; ...
lam_19; lam_19; lam_8; lam_8; lam_9; lam_9; lam_9; lam_15; lam_17; lam_16];

pol = 1; %tipo de polarização: (1) horizontal, (2) vertical

%----------------------------------Modelo do Espaço-Livre----------------------------------------
L_fsl = 32.4 + 20*log10(f) + 20*log10(TxRx);
scatter(TxRx_log,L_fsl,'g',"filled"); hold on;

%----------------------------------------Modelo de Egli-----------------------------------------
%(40MHz < f < 1GHz, d <= 60km) Fonte: Propagation Loss Prediction: A Comparative Study with application to the mobile radio channel (Delisle, 1985)
k = 0;
for k = 1:length(TxRx)
  L1_e(k) = 20*log10(f) + 40*log10(TxRx(k)) - 20*log10(hb_e(k));
  if hm_e(k) <= 10
    L2_e(k) = 76.3 - 10*log10(hm_e(k));
  elseif hm_e(k) > 10
    L2_e(k) = 85.9 - 20*log10(hm_e(k));
  endif
endfor
L_e = L1_e + L2_e; %valor final da PL pelo modelo de Egli
scatter(TxRx_log,L_e,'b',"filled"); hold on;

%----------------------------------Modelo ITU-R P.1812-5-----------------------------------------
Lb = [];
m = 0;
j = 1;

for m = 1:length(TxRx)  %registra o Lb de cada enlace em um vetor Lb[]
  Lb(j) = tl_p1812(f_ghz, p, d(m,:), h(m,:), R(m,:), Ct(m,:), zone(m,:), ...
  htg, hrg, phi_t(m,:), phi_r(m,:), lam_t(m,:), lam_r(m,:), pol); %acessa cada linha das
  %matrizes com os parâmetros de entrada (cada linha equivale aos dados de um dos
```

```
  %enlaces
  j = j + 1;
endfor
scatter(TxRx_log, Lb, 'r', "filled"); hold on;

%-----------------PLOTA TODAS AS AMOSTRAS MEDIDAS DE PL--------------------
i = 0;
for i = 1:length(TxRx)
    scatter(x_link(i,:), PL_m(i,:), 'c'); hold on; grid minor on %acessa cada linha das
%matrizes x_link e PL_m (cada linha corresponde a um vetor associado a um Enlace)
endfor
%-------------------------------------------------------------------------------------------------
xlabel('distância 10log[Tx-Rx(km)/0.1]');
ylabel('Perda de caminho (dB)');
title('C O M P A R A Ç Ã O  D E  M O D E L O S  D E  P R O P A G A Ç Ã O');
legend('FSPL', 'Egli', 'P.1812', 'Dados de medição');

%--------PLOTA AS MÉDIAS DAS AMOSTRAS COM OS VALORES DE PL--------
figure
a = 0;
PL_media = [];
for a = 1:length(TxRx)
    PL_media(a) = mean(PL_m(a,:));  %gera um vetor com as médias dos enlaces
endfor
scatter(TxRx_log,L_fsl,'g',"filled"); hold on;
scatter(TxRx_log,L_e,'b',"filled"); hold on;
scatter(TxRx_log,Lb,'r',"filled"); hold on;
scatter(TxRx_log,PL_media,'x'); grid minor on;

xlabel('distância 10log[Tx-Rx(km)/0.1]');
ylabel('Perda de caminho (dB)');
title('C O M P A R A Ç Ã O  D E  M O D E L O S  D E  P R O P A G A Ç Ã O');
legend('FSPL', 'Egli', 'P.1812', 'Média das medições');
%-------------------------------------------------------------------------------------------------
%CALCULA A DISTÂNCIA ENTRE OS PL DOS MODELOS E AS MEDIÇÕES MÉDIAS
Dif_p1812 = abs(PL_media - Lb)
Dif_Egli = abs(PL_media - L_e)
Dif_FSPL = abs(PL_media - L_fsl)
```

## ABORDAGEM 2:

```
clc, clear all, format short
```

```
%ALUNO: BRYAN DA SILVA DUARTE
%
%ESTE SCRIPT DETERMINA AS PERDAS DE CAMINHO (PL) PREVISTAS PARA DIFERENTES ENLACES
%EM UM MESMO CANAL.
%MODELOS DE PROPAGAÇÃO UTILIZADOS:
%MODELO EGLI, MODELO DO ESPAÇO-LIVRE, MODELO ITU-R P.1812-5 (ABORDAGEM 2)

%BANCO DE DADOS 1

%-------DADOS DE ENTRADA--------------------------------------------------------

f = 915; %frequência em MHz
TxRx = [0.115 0.183 0.256 0.442 0.508 0.551 0.561 0.573 0.651 0.679 0.906 0.917 ...
1.089 1.109 1.123 1.277 1.300 1.373 1.394 1.548 1.755 1.777 1.877 1.992 2.027 ...
2.246 2.335 2.352 3.546 3.750]; %vetor com as distâncias Tx-Rx referentes a cada enlace
%analisado, em km -> 2-1, 1-3, 2-3, 3-4, 12-13, 17-11, 12-11, 1-4, 5-7, 2-4, 17-14,
%7-18, 4-7, 17-12, 12-10, 17-13, 12-14, 7-19, 5-18, 4-18, 5-19, 4-19, 5-8, 4-8, 7-9,
%4-9, 5-9, 12-15, 17-16, 12-16

TxRx_log = 10*log10(TxRx/0.1);

% Dados de campanha de medição
PL_m1 = [85 85 88.125 88.125 86.25 86.25 86.875 86.875 83.75 85]; %valores medidos %de PL (Enlace 2-1)
x_link1 = TxRx(1)*ones(1,length(PL_m1));
x_link1 = 10*log10(x_link1/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 2-1)
PL_m2 = [120 110 105 115.625 114.375 110.625 108.75 106.25 103.75 120]; %valores %medidos de PL (Enlace 1-3)
x_link2 = TxRx(2)*ones(1,length(PL_m2));
x_link2 = 10*log10(x_link2/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 1-3)
PL_m3 = [110 113.75 114.375 111.875 110.625 107.8125 110 113.75 114.375 110]; %valores medidos de PL (Enlace 2-3)
x_link3 = TxRx(3)*ones(1,length(PL_m3));
x_link3 = 10*log10(x_link3/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 2-3)
PL_m4 = [120 118.75 117.8125 113.75 115.625 120.9375 121.875 128.75 128.125 120]; %valores medidos de PL (Enlace 3-4)
x_link4 = TxRx(4)*ones(1,length(PL_m4));
x_link4 = 10*log10(x_link4/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 3-4)
PL_m5 = [120 125 121.875 120.9375 118.75 123.125 123.75 124.0625 122.1875 120]; %valores medidos de PL (Enlace 12-13)
x_link5 = TxRx(5)*ones(1,length(PL_m5));
x_link5 = 10*log10(x_link5/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 12-13)
PL_m6 = [106.875 105 105.625 105.9375 106.875 105 105 105.625 105.9375 105]; %valores medidos de PL (Enlace 17-11)
x_link6 = TxRx(6)*ones(1,length(PL_m6));
x_link6 = 10*log10(x_link6/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 17-11)
PL_m7 = [117.8125 115.625 115.9375 114.375 117.8125 115.625 115.9375 114.375 117.8125 117.8125]; %valores medidos de PL (Enlace 12-
11)
```

```
x_link7 = TxRx(7)*ones(1,length(PL_m7));

x_link7 = 10*log10(x_link7/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 12-11)

PL_m8 = [117.8125 115.625 115.9375 114.375 113.75 117.8125 115.625 115.9375 114.375 114.375]; %valores medidos de PL (Enlace 1-4)

x_link8 = TxRx(8)*ones(1,length(PL_m8));

x_link8 = 10*log10(x_link8/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 1-4)

PL_m9 = [120 115.625 117.8125 118.75 120.9375 122.1875 123.125 123.75 120 120]; %valores medidos de PL (Enlace 5-7)

x_link9 = TxRx(9)*ones(1,length(PL_m9));

x_link9 = 10*log10(x_link9/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 5-7)

PL_m10 = [125 129.0625 125.9375 126.875 128.125 135 131.875 136.25 136.875 138.125]; %valores medidos de PL (Enlace 2-4)

x_link10 = TxRx(10)*ones(1,length(PL_m10));

x_link10 = 10*log10(x_link10/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 2-4)

PL_m11 = [130 130.9375 128.75 127.8125 129.6875 130 130.9375 128.75 127.8125 129.6875]; %valores medidos de PL (Enlace 17-14)

x_link11 = TxRx(11)*ones(1,length(PL_m11));

x_link11 = 10*log10(x_link11/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 17-14)

PL_m12 = [122.1875 120.9375 120 122.1875 120.9375 120 120 120 120 120]; %valores %medidos de PL (Enlace 7-18)

x_link12 = TxRx(12)*ones(1,length(PL_m12));

x_link12 = 10*log10(x_link12/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 7-18)

PL_m13 = [129.6875 129.0625 127.8125 126.875 127.1875 125 125.9375 123.75 125 125]; %valores medidos de PL (Enlace 4-7)

x_link13 = TxRx(13)*ones(1,length(PL_m13));

x_link13 = 10*log10(x_link13/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 4-7)

PL_m14 = [129.6875 129.0625 130.9375 131.875 133.125 136.25 136.875 139.0625 129.6875 129.0625]; %valores medidos de PL (Enlace 17-
12)

x_link14 = TxRx(14)*ones(1,length(PL_m14));

x_link14 = 10*log10(x_link14/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 17-12)

PL_m15 = [140 136.875 139.0625 149.375 148.125 143.125 142.1875 140.9375 140 140]; %valores medidos de PL (Enlace 12-10)

x_link15 = TxRx(15)*ones(1,length(PL_m15));

x_link15 = 10*log10(x_link15/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 12-10)

PL_m16 = [136.25 135 130.9375 129.6875 129.0625 127.8125 136.25 135 135 135]; %valores medidos de PL (Enlace 17-13)

x_link16 = TxRx(16)*ones(1,length(PL_m16));

x_link16 = 10*log10(x_link16/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 17-13)

PL_m17 = [133.125 131.875 134.0625 135 136.25 136.875 138.125 135 135 135]; %valores medidos de PL (Enlace 12-14)

x_link17 = TxRx(17)*ones(1,length(PL_m17));

x_link17 = 10*log10(x_link17/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 12-14)

PL_m18 = [142.1875 138.125 136.875 135 133.125 131.875 130.9375 129.6875 142.1875 138.125]; %valores medidos de PL (Enlace 7-19)

x_link18 = TxRx(18)*ones(1,length(PL_m18));

x_link18 = 10*log10(x_link18/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 7-19)

PL_m19 = [123.75 122.1875 122.96875 121.09375 120 118.75 123.75 122.1875 122.96875 120]; %valores medidos de PL (Enlace 5-18)

x_link19 = TxRx(19)*ones(1,length(PL_m19));

x_link19 = 10*log10(x_link19/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 5-18)

PL_m20 = [120 118.75 117.8125 115.625 114.375 120 118.75 117.8125 115.625 114.375]; %valores medidos de PL (Enlace 4-18)

x_link20 = TxRx(20)*ones(1,length(PL_m20));

x_link20 = 10*log10(x_link20/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 4-18)

PL_m21 = [123.75 122.96875 122.1875 123.75 122.96875 122.1875 122.96875 122.1875 122.96875 122.1875]; %valores medidos de PL (Enlace
5-19)
```

```
x_link21 = TxRx(21)*ones(1,length(PL_m21));
x_link21 = 10*log10(x_link21/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 5-19)
PL_m22 = [127.8125 126.875 125.9375 125 123.75 127.8125 126.875 125.9375 125 125]; %valores medidos de PL (Enlace 4-19)
x_link22 = TxRx(22)*ones(1,length(PL_m22));
x_link22 = 10*log10(x_link22/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 4-19)
PL_m23 = [123.75 125 125 125 125 125 125 125 125 125]; %valores medidos de PL %(Enlace 5-8)
x_link23 = TxRx(23)*ones(1,length(PL_m23));
x_link23 = 10*log10(x_link23/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 5-8)
PL_m24 = [129.6875 130.9375 131.875 133.125 135 129.6875 130.9375 131.875 133.125 135]; %valores medidos de PL (Enlace 4-8)
x_link24 = TxRx(24)*ones(1,length(PL_m24));
x_link24 = 10*log10(x_link24/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 4-8)
PL_m25 = [125.9375 125 123.75 122.96875 125.9375 125 123.75 122.96875 125 125]; %valores medidos de PL (Enlace 7-9)
x_link25 = TxRx(25)*ones(1,length(PL_m25));
x_link25 = 10*log10(x_link25/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 7-9)
PL_m26 = [118.75 117.8125 116.5625 115.625 118.75 117.8125 116.5625 115.625 118.75 117.8125]; %valores medidos de PL (Enlace 4-9)
x_link26 = TxRx(26)*ones(1,length(PL_m26));
x_link26 = 10*log10(x_link26/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 4-9)
PL_m27 = [128.75 127.8125 126.875 125.9375 125 128.75 127.8125 126.875 125.9375 125]; %valores medidos de PL (Enlace 5-9)
x_link27 = TxRx(27)*ones(1,length(PL_m27));
x_link27 = 10*log10(x_link27/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 5-9)
PL_m28 = [129.6875 130.9375 131.875 133.125 129.6875 130.9375 131.875 133.125 133.125 133.125]; %valores medidos de PL (Enlace 12-15)
x_link28 = TxRx(28)*ones(1,length(PL_m28));
x_link28 = 10*log10(x_link28/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 12-15)
PL_m29 = [127.8125 126.875 125.9375 125 123.75 122.96875 125 125 125 125]; %valores medidos de PL (Enlace 17-16)
x_link29 = TxRx(29)*ones(1,length(PL_m29));
x_link29 = 10*log10(x_link29/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 17-16)
PL_m30 = [139.0625 138.125 136.25 135 134.0625 130.9375 131.875 133.125 144.0625 146.25]; %valores medidos de PL (Enlace 12-16)
x_link30 = TxRx(30)*ones(1,length(PL_m30));
x_link30 = 10*log10(x_link30/0.1); %vetor para plotagem dos valores medidos de PL %(Enlace 12-16)

PL_m = [PL_m1; PL_m2; PL_m3; PL_m4; PL_m5; PL_m6; PL_m7; PL_m8; PL_m9; PL_m10; PL_m11; ...
PL_m12; PL_m13; PL_m14; PL_m15; PL_m16; PL_m17; PL_m18; PL_m19; PL_m20; PL_m21; PL_m22; ...
PL_m23; PL_m24; PL_m25; PL_m26; PL_m27; PL_m28; PL_m29; PL_m30];

x_link = [x_link1; x_link2; x_link3; x_link4; x_link5; x_link6; x_link7; x_link8; x_link9; ...
x_link10; x_link11; x_link12; x_link13; x_link14; x_link15; x_link16; x_link17; x_link18; ...
x_link19; x_link20; x_link21; x_link22; x_link23; x_link24; x_link25; x_link26; x_link27; ...
x_link28; x_link29; x_link30]; %matriz com vetores de distância dos enlaces em 10*log10(d/d0)

% Dados de Entrada do Modelo de Egli
hb_e = 2.5*ones(1,30);
hm_e = 2.5*ones(1,30);
```

```
% Dados de Entrada do Modelo ITU-R P.1812-5
p = 50; %porcentagem não excedida
f_ghz = f/1000; %frequência em GHz

passo = []; %passo dos vetores de distância dos pontos do perfil
n = 30; %número de pontos considerados no perfil de terreno
a = 0;
for a = 1:length(TxRx)
  passo(a) = TxRx(a)/(n-1);
endfor

d1 = [0:passo(1):TxRx(1)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 2-1)
d2 = [0:passo(2):TxRx(2)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 1-3)
d3 = [0:passo(3):TxRx(3)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 2-3)
d4 = [0:passo(4):TxRx(4)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 3-4)
d5 = [0:passo(5):TxRx(5)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 12-%13)
d6 = [0:passo(6):TxRx(6)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 17-%11)
d7 = [0:passo(7):TxRx(7)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 12-%11)
d8 = [0:passo(8):TxRx(8)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 1-4)
d9 = [0:passo(9):TxRx(9)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 5-7)
d10 = [0:passo(10):TxRx(10)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 2-%4)
d11 = [0:passo(11):TxRx(11)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace %17-14)
d12 = [0:passo(12):TxRx(12)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 7-%18)
d13 = [0:passo(13):TxRx(13)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 4-%7)
d14 = [0:passo(14):TxRx(14)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace %17-12)
d15 = [0:passo(15):TxRx(15)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace %12-10)
d16 = [0:passo(16):TxRx(16)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace %17-13)
d17 = [0:passo(17):TxRx(17)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace %12-14)
d18 = [0:passo(18):TxRx(18)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 7-%19)
d19 = [0:passo(19):TxRx(19)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 5-%18)
d20 = [0:passo(20):TxRx(20)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 4-%18)
d21 = [0:passo(21):TxRx(21)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 5-%19)
d22 = [0:passo(22):TxRx(22)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 4-%19)
d23 = [0:passo(23):TxRx(23)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 5-%8)
d24 = [0:passo(24):TxRx(24)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 4-%8)
d25 = [0:passo(25):TxRx(25)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 7-%9)
d26 = [0:passo(26):TxRx(26)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 4-%9)
d27 = [0:passo(27):TxRx(27)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace 5-%9)
d28 = [0:passo(28):TxRx(28)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace %12-15)
d29 = [0:passo(29):TxRx(29)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace %17-16)
d30 = [0:passo(30):TxRx(30)]; %distância do ponto do perfil até o Tx em 'km' (enlace %12-16)

d = [d1; d2; d3; d4; d5; d6; d7; d8; d9; d10; d11; d12; d13; d14; d15; d16; d17; ...
```

```
d18; d19; d20; d21; d22; d23; d24; d25; d26; d27; d28; d29; d30];

h1 = [528 528 528 528 529 529 529 529 529 529 529 529 530 530 530 530 530 530 ...
530 530 530 531 531 531 531 531 531 531 531 531]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 2-1)
h2 = [531 531 531 531 531 531 531 531 531 531 531 531 530 530 530 530 530 530 ...
530 530 530 530 530 530 530 531 531 531 530 530]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 1-3)
h3 = [528 528 528 528 529 529 529 529 529 529 529 529 529 529 529 529 529 529 ...
529 529 530 530 530 530 530 530 530 530 530 530]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 2-3)
h4 = [530 531 531 531 532 532 533 533 534 534 534 535 535 536 536 537 537 537 ...
538 538 538 539 539 539 539 539 539 539 540 540]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 3-4)
h5 = [585 586 586 587 588 589 589 590 591 591 592 592 593 593 593 593 593 593 ...
593 593 594 594 594 594 595 595 596 596 596 597]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 12-13)
h6 = [556 556 557 557 558 558 558 559 560 560 561 562 562 563 564 564 565 565 ...
566 566 567 568 568 569 569 570 570 571 571 572]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 17-11)
h7 = [585 585 585 584 584 583 583 582 582 582 581 581 580 580 579 579 578 578 ...
577 576 576 575 575 575 574 574 573 572 572 572]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 12-11)
h8 = [531 531 531 531 531 532 532 533 533 534 534 535 535 536 536 536 537 537 ...
538 538 538 538 539 539 539 539 539 539 539 540]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 1-4)
h9 = [548 547 547 547 547 547 547 547 547 547 547 547 548 548 548 548 548 548 548 ...
548 548 548 548 549 549 549 549 550 550 550 550]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 5-7)
h10 = [528 529 529 530 530 530 530 531 531 531 532 532 533 534 534 535 535 536 ...
537 537 537 538 538 538 539 539 539 539 539 540]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 2-4)
h11 = [556 556 556 555 556 556 556 555 555 554 553 553 552 551 551 550 548 546 ...
545 544 543 543 544 544 545 546 547 547 548 550]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 17-14)
h12 = [550 550 551 551 551 551 550 550 550 550 550 550 550 551 551 552 552 552 ...
553 553 554 554 555 554 554 554 544 554 555 555]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 7-18)
h13 = [540 541 542 542 542 542 541 541 541 541 542 542 543 543 543 544 544 545 ...
545 544 544 544 545 546 548 548 549 549 550 550]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 4-7)
h14 = [556 557 558 558 560 561 562 564 565 566 567 568 569 570 571 572 573 574 ...
575 576 577 578 579 580 581 582 583 583 584 585]; %altura de cada ponto do perfil
```

```
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 17-12)
h15 = [585 584 583 582 581 580 579 577 576 574 573 572 570 568 567 565 564 562 ...
561 560 558 557 556 555 553 552 551 550 547 546]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 12-10)
h16 = [556 557 558 559 561 562 564 566 567 569 570 571 572 574 575 577 578 580 ...
581 582 584 585 587 588 590 591 592 593 594 597]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 17-13)
h17 = [585 584 583 582 580 579 577 574 572 570 569 568 567 564 561 559 557 555 ...
554 553 551 550 549 549 550 550 550 550 550 550]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 12-14)
h18 = [550 550 550 550 549 548 548 549 549 550 551 551 551 551 551 551 551 551 ...
551 551 551 550 550 550 550 551 551 551 550 550]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 7-19)
h19 = [548 546 546 545 545 545 545 544 543 543 544 545 544 543 543 544 545 546 ...
547 548 549 550 550 551 551 552 552 553 554 555]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 5-18)
h20 = [540 540 539 539 539 539 539 539 538 537 537 538 539 539 538 538 539 541 ...
542 543 544 545 547 548 549 550 551 552 553 554]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 4-18)
h21 = [548 546 545 545 545 544 544 543 545 545 544 542 541 541 542 543 543 545 ...
545 546 546 547 547 547 548 548 549 550 550 550]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 5-19)
h22 = [540 539 538 538 538 538 537 536 535 534 532 529 526 525 528 532 536 538 ...
540 542 543 543 544 544 545 545 547 548 549 550]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 4-19)
h23 = [548 546 545 545 545 544 543 543 545 544 543 543 544 545 547 548 550 550 ...
550 551 552 553 554 556 556 556 557 558 559 560]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 5-8)
h24 = [540 540 539 539 539 538 538 537 536 535 534 533 534 537 540 542 543 545 ...
546 547 548 550 550 551 553 554 556 558 559 560]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 4-8)
h25 = [550 550 550 548 548 548 549 550 550 550 549 550 549 549 549 548 548 548 ...
547 547 547 547 547 547 546 546 547 547 548 550]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 7-9)
h26 = [540 539 537 537 537 535 533 530 527 524 521 522 526 530 532 533 534 536 ...
537 537 538 539 540 541 541 542 544 545 547 550]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 4-9)
h27 = [548 545 545 544 543 542 543 545 541 538 537 538 539 541 542 542 542 542 ...
541 542 542 544 544 544 544 544 545 546 547 550]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 5-9)
h28 = [585 583 581 576 571 567 563 563 561 559 559 560 565 568 568 566 567 568 ...
569 571 573 574 573 574 575 574 573 574 576 577]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 12-15)
```

```
h29 = [556 555 554 551 548 543 542 544 547 548 549 552 553 558 560 561 563 564 ...
566 567 567 565 565 572 578 582 588 593 598 604]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 17-16)
h30 = [585 582 575 567 565 563 559 562 568 568 568 570 573 575 575 576 575 577 ...
578 583 580 576 572 571 578 585 589 595 598 605]; %altura de cada ponto do perfil
%entre Tx e Rx, em relação ao sea level, em 'm' (enlace 12-16)

h = [h1; h2; h3; h4; h5; h6; h7; h8; h9; h10; h11; h12; h13; h14; h15; h16; h17; ...
h18; h19; h20; h21; h22; h23; h24; h25; h26; h27; h28; h29; h30];

h1m = sum(h1)/21;

R1 = [15 0*ones(1,length(d1)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 2-1)
R2 = [10 0*ones(1,length(d2)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 1-3)
R3 = [15 0*ones(1,length(d3)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 2-3)
R4 = [10 0*ones(1,length(d4)-2) 15];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 3-4)
R5 = [10 0*ones(1,length(d5)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 12-13)
R6 = [10 0*ones(1,length(d6)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 17-11)
R7 = [10 0*ones(1,length(d7)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 12-11)
R8 = [10 0*ones(1,length(d8)-2) 15];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 1-4)
R9 = [10 0*ones(1,length(d9)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 5-7)
R10 = [15 0*ones(1,length(d10)-2) 15];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 2-4)
R11 = [10 0*ones(1,length(d11)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 17-14)
R12 = [10 0*ones(1,length(d12)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 7-18)
R13 = [15 0*ones(1,length(d13)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 4-7)
R14 = [10 0*ones(1,length(d14)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 17-12)
R15 = [10 0*ones(1,length(d15)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 12-10)
R16 = [10 0*ones(1,length(d16)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
```

```
%ponto do perfil em 'm' (enlace 17-13)
R17 = [10 0*ones(1,length(d17)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 12-14)
R18 = [10 0*ones(1,length(d18)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 7-19)
R19 = [10 0*ones(1,length(d19)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 5-18)
R20 = [15 0*ones(1,length(d20)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 4-18)
R21 = [10 0*ones(1,length(d21)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 5-19)
R22 = [15 0*ones(1,length(d22)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 4-19)
R23 = [10 0*ones(1,length(d23)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 5-8)
R24 = [15 0*ones(1,length(d24)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 4-8)
R25 = [10 0*ones(1,length(d25)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 7-9)
R26 = [15 0*ones(1,length(d26)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 4-9)
R27 = [10 0*ones(1,length(d27)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 5-9)
R28 = [10 0*ones(1,length(d28)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 12-15)
R29 = [10 0*ones(1,length(d29)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 17-16)
R30 = [10 0*ones(1,length(d30)-2) 10];  %altura do clutter representativo para cada
%ponto do perfil em 'm' (enlace 12-16)

R = [R1; R2; R3; R4; R5; R6; R7; R8; R9; R10; R11; R12; R13; R14; R15; R16; R17; ...
R18; R19; R20; R21; R22; R23; R24; R25; R26; R27; R28; R29; R30];

Ct1 = [4 2*ones(1,length(d1)-1)]; %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea %(1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 2-1)
Ct2 = 2*ones(1,length(d2)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1),  %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 1-3)
Ct3 = [4 2*ones(1,length(d3)-1)]; %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea %(1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 2-3)
Ct4 = [2*ones(1,length(d4)-1) 4]; %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea %(1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 3-4)
Ct5 = 2*ones(1,length(d5)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 12-13)
Ct6 = 2*ones(1,length(d6)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 17-11)
```

Ct7 = 2*ones(1,length(d7)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 12-11)

Ct8 = [2*ones(1,length(d8)-1) 4]; %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea %(1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 1-4)

Ct9 = 2*ones(1,length(d9)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 5-7)

Ct10 = [4 2*ones(1,length(d10)-2) 4]; %tipo de clutter para cada ponto do perfil: %Water/sea (1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). %(Enlace 2-4)

Ct11 = 2*ones(1,length(d11)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 17-14)

Ct12 = 2*ones(1,length(d12)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 7-18)

Ct13 = [4 2*ones(1,length(d13)-1)]; %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea %(1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 4-7)

Ct14 = 2*ones(1,length(d14)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 17-12)

Ct15 = 2*ones(1,length(d15)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 12-10)

Ct16 = 2*ones(1,length(d16)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 17-13)

Ct17 = 2*ones(1,length(d17)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 12-14)

Ct18 = 2*ones(1,length(d18)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 7-19)

Ct19 = 2*ones(1,length(d19)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 5-18)

Ct20 = [4 2*ones(1,length(d20)-1)]; %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea %(1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 4-%18)

Ct21 = 2*ones(1,length(d21)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 5-19)

Ct22 = [4 2*ones(1,length(d22)-1)]; %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea %(1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 4-%19)

Ct23 = 2*ones(1,length(d23)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 5-8)

Ct24 = [4 2*ones(1,length(d24)-1)]; %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea %(1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 4-8)

Ct25 = 2*ones(1,length(d25)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 7-9)

Ct26 = [4 2*ones(1,length(d26)-1)]; %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea %(1), Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 4-9)

Ct27 = 2*ones(1,length(d27)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 5-9)

Ct28 = 2*ones(1,length(d28)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 12-15)

Ct29 = 2*ones(1,length(d29)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 17-16)

Ct30 = 2*ones(1,length(d30)); %tipo de clutter para cada ponto do perfil: Water/sea (1), %Open/rural (2), Suburban (3), Urban/trees/forest (4), Dense urban (5). (Enlace 12-16)

Ct = [Ct1; Ct2; Ct3; Ct4; Ct5; Ct6; Ct7; Ct8; Ct9; Ct10; Ct11; Ct12; Ct13; Ct14; ...

Ct15; Ct16; Ct17; Ct18; Ct19; Ct20; Ct21; Ct22; Ct23; Ct24; Ct25; Ct26; Ct27; Ct28; Ct29; Ct30];

```
zone1 = 4*ones(1,length(d1)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), Coastal %land (3), or Sea (1). (Enlace 2-1)
zone2 = 4*ones(1,length(d2)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), Coastal %land (3), or Sea (1). (Enlace 1-3)
zone3 = 4*ones(1,length(d3)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), Coastal %land (3), or Sea (1). (Enlace 2-3)
zone4 = 4*ones(1,length(d4)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), Coastal %land (3), or Sea (1). (Enlace 3-4)
zone5 = 4*ones(1,length(d5)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), Coastal %land (3), or Sea (1). (Enlace 12-13)
zone6 = 4*ones(1,length(d6)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), Coastal %land (3), or Sea (1). (Enlace 17-11)
zone7 = 4*ones(1,length(d7)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), Coastal %land (3), or Sea (1). (Enlace 12-11)
zone8 = 4*ones(1,length(d8)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), Coastal %land (3), or Sea (1). (Enlace 1-4)
zone9 = 4*ones(1,length(d9)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), Coastal %land (3), or Sea (1). (Enlace 5-7)
zone10 = 4*ones(1,length(d10)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), %Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 2-4)
zone11 = 4*ones(1,length(d11)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), %Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 17-14)
zone12 = 4*ones(1,length(d12)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), %Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 7-18)
zone13 = 4*ones(1,length(d13)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), %Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 4-7)
zone14 = 4*ones(1,length(d14)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), %Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 17-12)
zone15 = 4*ones(1,length(d15)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), %Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 12-10)
zone16 = 4*ones(1,length(d16)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), %Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 17-13)
zone17 = 4*ones(1,length(d17)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), %Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 12-14)
zone18 = 4*ones(1,length(d18)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), %Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 7-19)
zone19 = 4*ones(1,length(d19)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), %Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 5-18)
zone20 = 4*ones(1,length(d20)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), %Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 4-18)
zone21 = 4*ones(1,length(d21)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), %Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 5-19)
zone22 = 4*ones(1,length(d22)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), %Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 4-19)
zone23 = 4*ones(1,length(d23)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), %Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 5-8)
zone24 = 4*ones(1,length(d24)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), %Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 4-8)
zone25 = 4*ones(1,length(d25)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), %Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 7-9)
zone26 = 4*ones(1,length(d26)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), %Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 4-9)
zone27 = 4*ones(1,length(d27)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), %Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 5-9)
zone28 = 4*ones(1,length(d28)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), %Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 12-15)
zone29 = 4*ones(1,length(d29)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), %Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 17-16)
zone30 = 4*ones(1,length(d30)); %vetor de 'radio-climatic zone types': Inland (4), %Coastal land (3), or Sea (1). (Enlace 12-16)

zone = [zone1; zone2; zone3; zone4; zone5; zone6; zone7; zone8; zone9; zone10; ...
zone11; zone12; zone13; zone14; zone15; zone16; zone17; zone18; zone19; zone20; ...
zone21; zone22; zone23; zone24; zone25; zone26; zone27; zone28; zone29; zone30];

htg = 2.5; %altura do Tx, em relação ao solo
hrg = 2.5; %altura do Rx, em relação ao solo

phi_1 = -18.471614; %latitude ponto 1
lam_1 = -49.019156; %longitude ponto 1
phi_2 = -18.471906; %latitude ponto 2
lam_2 = -49.020203; %longitude ponto 2
phi_3 = -18.472800; %latitude ponto 3
```

```
lam_3 = -49.017964; %longitude ponto 3
phi_4 = -18.472444; %latitude ponto 4
lam_4 = -49.013800; %longitude ponto 4
phi_5 = -18.474361; %latitude ponto 5
lam_5 = -49.008839; %longitude ponto 5
phi_6 = -18.475028; %latitude ponto 6
lam_6 = -49.007594; %longitude ponto 6
phi_7 = -18.471458; %latitude ponto 7
lam_7 = -49.003517; %longitude ponto 7
phi_8 = -18.459161; %latitude ponto 8
lam_8 = -49.001069; %longitude ponto 8
phi_9 = -18.453383; %latitude ponto 9
lam_9 = -49.006558; %longitude ponto 9
phi_10 = -18.485211; %latitude ponto 10
lam_10 = -49.008033; %longitude ponto 10
phi_11 = -18.484289; %latitude ponto 11
lam_11 = -49.001303; %longitude ponto 11
phi_12 = -18.488128; %latitude ponto 12
lam_12 = -48.997839; %longitude ponto 12
phi_13 = -18.485328; %latitude ponto 13
lam_13 = -48.994028; %longitude ponto 13
phi_14 = -18.487733; %latitude ponto 14
lam_14 = -49.010156; %longitude ponto 14
phi_15 = -18.496831; %latitude ponto 15
lam_15 = -49.018158; %longitude ponto 15
phi_16 = -18.502800; %latitude ponto 16
lam_16 = -49.029856; %longitude ponto 16
phi_17 = -18.481031; %latitude ponto 17
lam_17 = -49.005242; %longitude ponto 17
phi_18 = -18.463239; %latitude ponto 18
lam_18 = -49.002758; %longitude ponto 18
phi_19 = -18.459100; %latitude ponto 19
lam_19 = -49.004461; %longitude ponto 19

phi_t = [phi_2; phi_1; phi_2; phi_3; phi_12; phi_17; phi_12; phi_1; phi_5; phi_2; ...
 phi_17; phi_7; phi_4; phi_17; phi_12; phi_17; phi_12; phi_7; phi_5; phi_4; phi_5; ...
 phi_4; phi_5; phi_4; phi_7; phi_4; phi_5; phi_12; phi_17; phi_12];

lam_t = [lam_2; lam_1; lam_2; lam_3; lam_12; lam_17; lam_12; lam_1; lam_5; lam_2; ...
lam_17; lam_7; lam_4; lam_17; lam_12; lam_17; lam_12; lam_7; lam_5; lam_4; lam_5; ...
lam_4; lam_5; lam_4; lam_7; lam_4; lam_5; lam_12; lam_17; lam_12];

phi_r = [phi_1; phi_3; phi_3; phi_4; phi_13; phi_11; phi_11; phi_4; phi_7; phi_4; ...
```

```
phi_14; phi_18; phi_7; phi_12; phi_10; phi_13; phi_14; phi_19; phi_18; phi_18; ...
phi_19; phi_19; phi_8; phi_8; phi_9; phi_9; phi_9; phi_15; phi_16; phi_16];

lam_r = [lam_1; lam_3; lam_3; lam_4; lam_13; lam_11; lam_11; lam_4; lam_7; lam_4; ...
lam_14; lam_18; lam_7; lam_12; lam_10; lam_13; lam_14; lam_19; lam_18; lam_18; ...
lam_19; lam_19; lam_8; lam_8; lam_9; lam_9; lam_9; lam_15; lam_17; lam_16];

pol = 2; %tipo de polarização: (1) horizontal, (2) vertical
%---------------------------------Modelo do Espaço-Livre----------------------------------------
L_fsl = 32.4 + 20*log10(f) + 20*log10(TxRx);
scatter(TxRx_log,L_fsl,'g',"filled"); hold on;

%---------------------------------------Modelo de Egli-----------------------------------------
%(40MHz < f < 1GHz, d <= 60km) Fonte: Propagation Loss Prediction: A Comparative Study with application to the mobile radio channel (Delisle, 1985)
k = 0;
for k = 1:length(TxRx)
  L1_e(k) = 20*log10(f) + 40*log10(TxRx(k)) - 20*log10(hb_e(k));%

  if hm_e(k) <= 10
    L2_e(k) = 76.3 - 10*log10(hm_e(k));
  elseif hm_e(k) > 10
    L2_e(k) = 85.9 - 20*log10(hm_e(k));

  endif
endfor
L_e = L1_e + L2_e;  %valor final da PL pelo modelo de Egli
scatter(TxRx_log,L_e,'b',"filled"); hold on;

%-----------------------------------Modelo ITU-R P.1812-5-----------------------------------
Lb = [];
m = 0;
j = 1;

for m = 1:length(TxRx)  %registra o Lb de cada enlace em um vetor Lb[]
  Lb(j) = tl_p1812(f_ghz, p, d(m,:), h(m,:), R(m,:), Ct(m,:), zone(m,:), ...
  htg, hrg, phi_t(m,:), phi_r(m,:), lam_t(m,:), lam_r(m,:), pol); %acessa cada linha das
  %matrizes com os parâmetros de entrada (cada linha equivale aos dados de um dos
  %enlaces
  j = j + 1;
endfor
scatter(TxRx_log, Lb, 'r', "filled"); hold on;
```

```
%----------------PLOTA TODAS AS AMOSTRAS MEDIDAS DE PL--------------------
i = 0;
for i = 1:length(TxRx)
   scatter(x_link(i,:), PL_m(i,:), 'c'); hold on; grid minor on %acessa cada linha das
%matrizes x_link e PL_m (cada linha corresponde a um vetor associado a um Enlace)
endfor
%-------------------------------------------------------------------------------------------------

xlabel('distância 10log[Tx-Rx(km)/0.1]');
ylabel('Perda de caminho (dB)');
title('C O M P A R A Ç Ã O  D E  M O D E L O S  D E  P R O P A G A Ç Ã O');
legend('FSPL', 'Egli', 'P.1812', 'Dados de medição');

%--------PLOTA AS MÉDIAS DAS AMOSTRAS COM OS VALORES DE PL---------
figure
a = 0;
PL_media = [];
for a = 1:length(TxRx)
   PL_media(a) = mean(PL_m(a,:));  %gera um vetor com as médias dos enlaces
endfor
scatter(TxRx_log,L_fsl,'g',"filled"); hold on;
scatter(TxRx_log,L_e,'b',"filled"); hold on;
scatter(TxRx_log,Lb,'r',"filled"); hold on;
scatter(TxRx_log,PL_media,'x'); grid minor on;

xlabel('distância 10log[Tx-Rx(km)/0.1]');
ylabel('Perda de caminho (dB)');
title('C O M P A R A Ç Ã O  D E  M O D E L O S  D E  P R O P A G A Ç Ã O');
legend('FSPL', 'Egli', 'P.1812', 'Média das medições');

%-------------------------------------------------------------------------------------------------
%CALCULA A DISTÂNCIA ENTRE OS PL DOS MODELOS E AS MEDIÇÕES MÉDIAS
Dif_p1812 = abs(PL_media - Lb)
Dif_Egli = abs(PL_media - L_e)
Dif_FSPL = abs(PL_media - L_fsl)
```

# Apêndice II

Valores de altura representativa de *clutter* **R** para os 3 bancos de dados, com utilização da abordagem 1 e da abordagem 2

**Tabela 21** – Valores de **R** para o banco de dados 1 usando a abordagem 1

| Banco de dados 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Dados de "R" utilizados para Abordagem 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2-1 | 1-3 | 2-3 | 3-4 | 12-13 | 17-11 | 12-11 | 1-4 | 5-7 | 2-4 | 17-14 | 7-18 | 4-7 | 17-12 | 12-10 | 17-13 | 12-14 | 7-19 | 5-18 | 4-18 | 5-19 | 4-19 | 5-8 | 4-8 | 7-9 | 4-9 | 5-9 | 12-15 | 17-16 | 12-16 |
| 15 | 10 | 15 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 15 | 10 | 10 | 15 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 15 | 10 | 15 | 10 | 15 | 10 | 15 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 15 | 15 | 15 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 15 | 0 | 15 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 15 | 0 | 15 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 15 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 10 | 10 | 15 | 10 | 10 | 10 | 15 | 10 | 15 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |

**Tabela 22** – Valores de **R** para o banco de dados 1 usando a abordagem 2

| Banco de dados 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Dados de "R" utilizados para Abordagem 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2-1 | 1-3 | 2-3 | 3-4 | 12-13 | 17-11 | 12-11 | 1-4 | 5-7 | 2-4 | 17-14 | 7-18 | 4-7 | 17-12 | 12-10 | 17-13 | 12-14 | 7-19 | 5-18 | 4-18 | 5-19 | 4-19 | 5-8 | 4-8 | 7-9 | 4-9 | 5-9 | 12-15 | 17-16 | 12-16 |
| 15 | 10 | 15 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 15 | 10 | 10 | 15 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 15 | 10 | 15 | 10 | 15 | 10 | 15 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 10 | 10 | 15 | 10 | 10 | 10 | 15 | 10 | 15 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |

**Tabela 23** – Valores de **R** para o banco de dados 2 usando a abordagem 1

| Banco de dados 2 | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Dados de "R" utilizados para Abordagem 1 | | | | | | | | |
| Enl. 1 | Enl. 2 | Enl. 3 | Enl. 4 | Enl. 5 | Enl. 6 | Enl. 7 | Enl. 8 | Enl. 9 |
| 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 0 | 15 | 15 | 0 | 15 | 15 | 15 | 0 | 0 |
| 0 | 15 | 0 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 |
| 0 | 15 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 15 | 15 |
| 15 | 0 | 15 | 15 | 0 | 0 | 0 | 15 | 15 |
| 15 | 0 | 15 | 15 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 15 | 15 |
| 15 | 0 | 15 | 15 | 0 | 0 | 0 | 15 | 15 |
| 15 | 0 | 15 | 0 | 0 | 15 | 0 | 10 | 0 |
| 15 | 0 | 15 | 0 | 15 | 15 | 0 | 15 | 0 |
| 15 | 0 | 15 | 0 | 15 | 15 | 0 | 15 | 10 |
| 15 | 0 | 15 | 15 | 0 | 15 | 15 | 0 | 0 |
| 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 10 | 10 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 10 | 10 |
| 15 | 0 | 15 | 0 | 10 | 15 | 15 | 0 | 10 |
| 0 | 15 | 15 | 15 | 10 | 15 | 15 | 10 | 10 |
| 15 | 15 | 15 | 15 | 10 | 15 | 15 | 10 | 10 |
| 15 | 15 | 15 | 15 | 10 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 15 | 10 | 15 | 15 | 10 | 15 |
| 0 | 15 | 0 | 0 | 10 | 15 | 0 | 15 | 15 |
| 0 | 15 | 0 | 15 | 10 | 15 | 0 | 10 | 15 |
| 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 10 | 10 | 15 |
| 15 | 0 | 10 | 15 | 0 | 15 | 10 | 15 | 10 |
| 15 | 0 | 10 | 0 | 0 | 10 | 10 | 0 | 10 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 10 | 15 | 10 |
| 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 15 | 10 | 15 | 15 |
| 0 | 15 | 10 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 0 | 15 | 10 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 0 | 15 | 10 | 0 | 0 | 15 | 15 | 10 | 10 |
| 10 | 15 | 10 | 10 | 10 | 15 | 15 | 10 | 15 |

**Tabela 24** – Valores de **R** para o banco de dados 2 usando a abordagem 2

| Banco de dados 2 | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Dados de "R" utilizados para Abordagem 2 | | | | | | | | |
| Enl. 1 | Enl. 2 | Enl. 3 | Enl. 4 | Enl. 5 | Enl. 6 | Enl. 7 | Enl. 8 | Enl. 9 |
| 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 10 | 15 | 10 | 10 | 10 | 15 | 15 | 10 | 15 |

**Tabela 25** – Valores de **R** para o banco de dados 3 usando a abordagem 1

| Banco de dados 3 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Dados de "R" utilizados para Abordagem 1 | | | | |
| Enl. 1 | Enl. 2 | Enl. 3 | Enl. 4 | Enl. 5 |
| 15 | 15 | 15 | 15 | 10 |
| 15 | 10 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 10 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 15 | 0 | 0 |
| 0 | 15 | 15 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 15 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 10 | 15 | 0 | 0 |
| 0 | 10 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 10 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 10 | 15 | 0 | 0 |
| 15 | 10 | 15 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 15 | 15 | 15 | 0 |
| 0 | 15 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 15 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 10 | 0 |
| 0 | 0 | 15 | 0 | 15 |
| 15 | 0 | 15 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 15 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 10 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 15 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 15 | 15 | 15 | 0 |
| 15 | 0 | 15 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 15 | 0 |
| 15 | 15 | 0 | 15 | 0 |
| 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |

**Tabela 26** – Valores de **R** para o banco de dados 3 usando a abordagem 2

| Banco de dados 3 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Dados de "R" utilizados para Abordagem 2 | | | | |
| Enl. 1 | Enl. 2 | Enl. 3 | Enl. 4 | Enl. 5 |
| 15 | 15 | 15 | 15 | 10 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |