

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE INFORMÁTICA
CURSO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

LUCAS PINHEIRO PONS

**Reconstruindo Mapas Rodoviários
a partir de Trajetórias GPS**

Monografia apresentada como requisito parcial
para a obtenção do grau de Bacharel em Ciência
da Computação

Orientador: Prof. Dr. Lucas Mello Schnorr

Porto Alegre
2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Carlos André Bulhões

Vice-Reitora: Prof^a. Patricia Pranke

Pró-Reitora de Graduação: Prof^a. Cíntia Inês Boll

Diretora do Instituto de Informática: Prof^a. Carla Maria Dal Sasso Freitas

Coordenador do Curso de Ciência de Computação: Prof. Marcelo Walter

Bibliotecário-chefe do Instituto de Informática: Alexsander Borges Ribeiro

*“In life, unlike chess,
the game continues after checkmate.”*

— ISAAC ASIMOV

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao meu orientador, professor Schnorr, por ter me guiado ao longo deste trabalho. Pelas diversas vezes que me ajudou, pelos ensinamentos e dicas valiosas da programação em R. Enfim, agradeço por ter viabilizado a realização do meu TCC e, portanto, minha graduação.

Agradeço à empresa InfraTrack e em especial ao CEO Leonardo Röpke, pela inspiração com o trabalho anterior sobre o tema, e pela disponibilização dos dados de rastreamento utilizados durante este trabalho. Sem essa contribuição, este trabalho não teria sido possível.

Agradeço àqueles próximos a mim e que me acompanharam ao longo dessa jornada. Amigos que fiz durante o curso e professores do Instituto de Informática. À minha família, meus pais e meu irmão pelo apoio, incentivo e por compreenderem minha ausência nesses últimos anos.

Por fim, um agradecimento especial à minha namorada e companheira amada. Por ter permanecido ao meu lado em todos os momentos, altos ou baixos. Pelo suporte emocional, pela parceria nas horas de lazer e acolhimento nas horas de sofrimento. Muito obrigado!

RESUMO

O tráfego rodoviário é um componente fundamental do cotidiano no mundo inteiro. Milhões de veículos navegam pelas estradas diariamente, e grande parte deles faz uso de alguma forma de rastreamento. Para operação correta de sistemas de rastreamento, a infraestrutura de rede que os suportam deve oferecer alta disponibilidade, e ter consciência sobre estado dessa conexão ao longo das rodovias pode contribuir para a utilização correta e bom aproveitamento desses sistemas. O objetivo deste trabalho é implementar uma forma de visualização apropriada para as informações de qualidade do sinal 2G nas estradas, através de mapas rodoviários enriquecidos com os dados de conectividade. O desenvolvimento foi realizado utilizando uma base de dados de rastreamento de veículos e algoritmos de reconstrução de mapas a partir de trajetórias GPS. Alguns diferentes tipos de algoritmos dessa área foram brevemente apresentados e comparados, bem como o processo de decisão para escolher um algoritmo adequado para os fins deste trabalho. Especificamente, um algoritmo de inserção parcial de trajetórias foi empregado, que funciona inserindo trajetórias em um grafo inicialmente vazio, realizando cálculos de correspondência parcial baseados na distância de Fréchet para identificar trechos conflitantes e combiná-los. Os grafos resultantes da combinação das trajetórias são utilizados para modelar a geometria da malha rodoviária e representar as informações sobre conectividade, além de possibilitar a consulta aos dados de rodovias ou rotas específicas. Todas as etapas do sistema de reconstrução de mapa foram detalhadas, desde o tratamento inicial dos dados à composição final das imagens. Os mapas gerados então foram utilizados em diferentes configurações e combinações para levantar algumas análises sobre o estado da cobertura de sinal 2G nas estradas do Rio Grande do Sul, destacando aspectos como as características distintas entre regiões ou períodos diferentes.

Palavras-chave: Visualização de dados. Conectividade em estradas. Mapas rodoviários. Geolocalização. Rastreamento veicular. Inserção de trajetórias.

Rebuilding road maps from GPS tracks

ABSTRACT

Road traffic is a fundamental component of everyday life all across the world. Millions of vehicles navigate the roads daily, and a significant share of those use some tracking. For the correct operation of tracking systems, the network infrastructure supporting them has to offer high availability, and being aware of the state of this connection along the roads can contribute to the proper utilization of these systems. This work aims to implement a form of visualization better suited for the information on the quality of 2G signals on the roads, using roadmaps enriched with connectivity data. This work employs records from a vehicle tracking database and algorithms for map reconstruction from GPS tracks. From a comparison among different algorithms in this area, the text demonstrates the decision process to choose the proper algorithm for this work. Specifically, a partial track insertion algorithm was employed, and it works by inserting trajectories into an initially empty graph, doing partial map-matching based on the Fréchet distance to identify conflicting sections and merge them. The graphs resulting from the combination of tracks are used to model the roadway geometry, representing connectivity information, as well as enabling queries for specific road or route data. All the steps that compose the map construction system were explained, ranging from the initial dataset treatment to the final composition of images. The generated maps were then used in different configurations and combinations to analyze the state of 2G signal coverage on the roads of Rio Grande do Sul, underlining aspects such as distinct characteristics across different periods.

Keywords: Data visualization. Road connectivity. Roadway maps. Geolocation. Vehicle tracking. Track insertion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Algoritmo baseado em <i>k-means</i>	15
Figura 2.2	Algoritmo baseado em densidade	15
Figura 2.3	Algoritmo de inserção incremental de trajetórias	16
Figura 3.1	Fluxo do processo de reconstrução do mapa.	18
Figura 3.2	Separação de Trajetórias	21
Figura 3.3	Identificação de seções da trajetória	23
Figura 3.4	Inserção de trecho sem sobreposição	24
Figura 3.5	Integração de trechos com sobreposição	25
Figura 3.6	Interpolação de dois pontos	26
Figura 3.7	Combinação de mapas parciais	27
Figura 3.8	Isolamento da trajetória de uma rodovia	28
Figura 3.9	Geração da imagem final do mapa reconstruído	29
Figura 4.1	Comparação entre os pontos originais e o mapa reconstruído	30
Figura 4.2	Comparação entre a malha rodoviária oficial e o mapa reconstruído	31
Figura 4.3	Mapa reconstruído completo	32
Figura 4.4	Evolução da conectividade no tempo	34
Figura 4.5	Diferença da conectividade da BR-101 entre 2018 e 2020	35
Figura 4.6	Visualização da conectividade de rodovias	36
Figura 4.7	Comparação dos dados de conectividade de veículos	37
Figura 4.8	Diferença dos mapas gerados com diferentes valores de ϵ	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Exemplo de entradas do conjunto de dados.....	19
Tabela 3.2	Exemplo de agrupamento e ordenação das entradas.	20
Tabela 3.3	Exemplo de separação de trajetórias.	20
Tabela 4.1	Valor médio da conectividade, em porcentagem, por região.....	33
Tabela 4.2	Valor médio da conectividade, em porcentagem, por ano.	35
Tabela 4.3	Tempo de execução para diferentes volumes de dados.	38
Tabela 4.4	Redução de densidade de pontos de acordo com o valor de ϵ	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2G	Segunda Geração de Telefonia Móvel
BR-###	Rodovia Federal de código ###
DAER	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
GPS	Global Positioning System
OSM	OpenStreetMap®
OSMF	OpenStreetMap Foundation
RS	Rio Grande do Sul
WGS	World Geodetic System

LISTA DE SÍMBOLOS

ϵ	Parâmetro de limite da distância de Fréchet no algoritmo de inserção incremental de trajetórias
$^{\circ}$	Grau(s) de latitude/longitude
h	Hora(s)
km	Quilômetro(s)
min	Minuto(s)
s	Segundo(s)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 TRABALHOS RELACIONADOS	14
2.1 Categorias de Algoritmos	14
2.1.1 Agrupamento de Pontos	14
2.1.2 Inserção Incremental de Trajetórias	15
2.1.3 Conexão de Interseções.....	16
2.2 Seleção do Algoritmo	16
3 CONTRIBUIÇÃO: RECONSTRUÇÃO DE MAPAS	18
3.1 Tratamento dos Dados	19
3.2 Identificação de Trajetórias	19
3.3 Reconstrução do Mapa com dados de Conectividade	22
3.3.1 Funcionamento básico do algoritmo.....	22
3.3.2 Consideração da conectividade.....	25
3.3.3 Combinação de Mapas Parciais	26
3.4 Consultar conectividade de uma rodovia	27
3.5 Geração de Imagens	28
4 RESULTADOS E ANÁLISE	30
4.1 Análise da conectividade	32
4.1.1 Análise relativa à geografia.....	33
4.1.2 Análise relativa ao tempo.....	33
4.1.3 Análise relativa a rodovias	36
4.1.4 Análise relativa a veículos	37
4.2 Discussão sobre desempenho e eficiência	38
5 CONCLUSÃO	41
5.1 Trabalhos Futuros	42
REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

Em meio aos milhões de veículos que compõem o tráfego rodoviário, existem diversos casos que se beneficiam ou necessitam de rastreamento: empresas de frete e transporte de cargas, companhias de transporte rodoviário e mesmo pessoas físicas em uma viagem. Isso porque o rastreamento oferece suporte à navegação e monitoramento de um veículo e seu estado, garantindo um nível de segurança e conforto aos envolvidos. Através dele, empresas podem controlar sua frota ou clientes que desejam monitorar uma entrega, por exemplo.

Esse rastreamento é implementado sobre uma infraestrutura de rede, e requer certo nível de disponibilidade e qualidade dessa para operar corretamente. Ter consciência do estado dessa conexão ao longo das rodovias pode contribuir para a utilização correta e bom aproveitamento do rastreamento, e uma visualização apropriada desse tipo de informação é extremamente importante para, por exemplo, antecipar problemas de conexão devido à infraestrutura. A proposta deste trabalho é atuar nesse sentido.

Um esforço na direção desse objetivo já foi realizado anteriormente no trabalho de Röpke (2023). Nesse trabalho, o mesmo problema de visualização da conectividade nas estradas foi abordado, mas a solução proposta foi baseada na divisão do território e mapeamento dos pontos em uma grade retangular, ao invés da reconstrução do mapa rodoviário. Essa estratégia permite visualizar os dados com certa precisão, dependendo da granularidade da grade, porém não resulta em um modelo detalhado do mapa rodoviário nem permite a consulta dos dados de uma rodovia.

Utilizando dados prévios de rastreamento de veículos, temos o objetivo de reconstruir um mapa das rodovias. Esse mapa pode então ser enriquecido sobrepondo a informação da qualidade do sinal que será calculada a partir da informação se as medidas de rastreamento foram obtidas online ou enviada posteriormente. Assim, o intuito é oferecer uma visualização compreensiva das rodovias que inclua os locais onde o sinal é de boa qualidade e onde o sinal é de qualidade ruim. Isso permitirá uma melhor adaptabilidade do sistema de rastreamento, pois poderemos antever locais onde sabidamente o sinal do veículo se torna offline.

O livro de Ahmed et al. (2015b) apresenta uma introdução geral ao tema de construção de mapas, bem como os principais algoritmos existentes para realizar essa tarefa, seus funcionamentos e características. Dentre outros, trabalhos como os de Edelkamp e Schrödl (2003), Davies, Beresford e Hopper (2006), Fathi e Krumm (2010) e Ahmed e Wenk (2012) são listados como alternativas interessantes com abordagens diferentes para resolver esse problema.

O trabalho descrito neste texto envolve o tratamento dos dados, transformando uma coleção de pontos geográficos em combinações ou estruturas que podem, então, ser utilizadas como fundação para um algoritmo de reconstrução de mapas. Os algoritmos listados acima foram analisados e comparados para selecionar um a ser adotado neste trabalho, sendo então estendido para comportar o processamento de metadados desses pontos. Nesse caso, essa informação é apenas o indicador de conectividade do ponto (*online/offline*), mas a mesma abordagem poderia ser utilizada para analisar outras características, como taxas de acidentes ou limite de velocidade, por exemplo.

Este documento está estruturado da seguinte forma. O Capítulo 2 apresenta brevemente os diferentes algoritmos e tipos de algoritmos de reconstrução de mapas considerados e analisados como alternativas para implementação da proposta, e outros trabalhos relacionados, bem como a motivação para a escolha do algoritmo utilizado. O Capítulo 3 apresenta a descrição do processo em si e seus passos, como o tratamento dos dados e implementação do algoritmo de construção. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos, dentre eles os mapas reconstruídos e a análise da qualidade do sinal nas rodovias. O Capítulo 5 contém a conclusão, e por fim as referências.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

Existem diversas abordagens e algoritmos diferentes relacionados a esse assunto de reconstrução de mapas, em trabalhos anteriores. O artigo de Tang et al. (2019), por exemplo, é uma contribuição recente onde um novo método é apresentado para identificar e modelar interseções entre estradas com alto nível de detalhamento e acurácia. Assim como esse artigo apresenta sua solução com um objetivo específico nas características e detalhes de interseções, outros também possuem suas particularidades, objetivos, vantagens e desvantagens específicas.

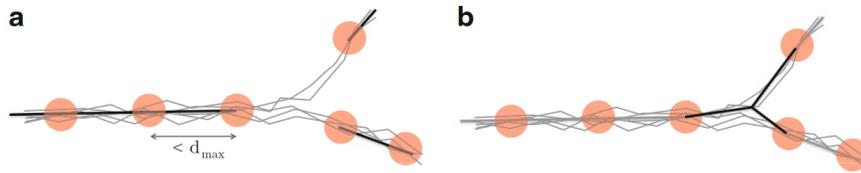
2.1 Categorias de Algoritmos

Em Ahmed et al. (2015b), os autores apresentam um panorama do estado da arte desses algoritmos à época, descrevendo o funcionamento básico e algumas características de cada um. As estratégias que constam no livro são separadas em três categorias algorítmicas: agrupamento de pontos, que inclui algoritmos baseados em *k-means*, densidade e complexos de vizinhança; inserção incremental de trajetórias; e conexão de interseções. Essas categorias são definidas baseadas na premissa sobre os dados e como o algoritmo interpreta e utiliza o conjunto de dados para derivar o mapa reconstruído.

2.1.1 Agrupamento de Pontos

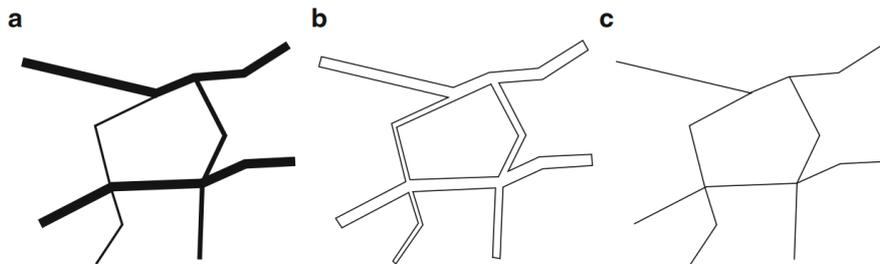
Nessa categoria, algoritmos assumem que a entrada consiste em um conjunto de pontos, e então esses pontos são agrupados de diferentes formas, dependendo da implementação específica, para obter interseções ou segmentos de estradas, que finalmente serão combinados para construir o mapa final. Em Edelkamp e Schrödl (2003), por exemplo, os autores apresentam um método que utiliza *k-means* para gerar interseções que são então conectados por segmentos, como pode ser observado na Figura 2.1. Já em Davies, Beresford e Hopper (2006), o método consiste em calcular a densidade para cada ponto (quantas trajetórias passam por aquele ponto), então calcular os contornos do histograma gerado, e por fim determinar as linhas centrais desses contornos para obter o grafo final (AHMED et al., 2015b). A Figura 2.2 ilustra esse processo.

Figura 2.1 – Algoritmo baseado em *k-means*. (a) Trajetórias, agrupamentos e segmentos. (b) Interseções.



Fonte: Ahmed et al. (2015b)

Figura 2.2 – Algoritmo baseado em densidade. (a) Histograma de densidade dos pontos a partir das trajetórias. (b) Contornos. (c) Grafo final com as linhas centrais dos contornos.

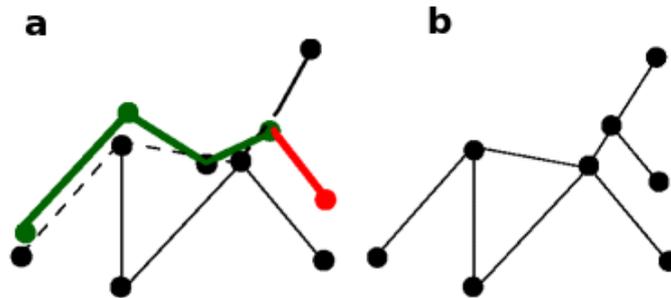


Fonte: Ahmed et al. (2015b)

2.1.2 Inserção Incremental de Trajetórias

Essa categoria engloba algoritmos que iniciam com um grafo inicialmente vazio e, conforme percorrem o conjunto de pontos já organizados em trajetórias, incrementam parcialmente esse mapa a partir dos segmentos de cada trajetória que não se encontravam previamente no mapa. O método proposto por Ahmed e Wenk (2012) implementa essa ideia calculando a correspondência parcial da trajetória sobre o mapa, identificando segmentos que se sobrepõem a uma seção do mapa ou não, para então adicionar e conectar esses novos segmentos ao grafo existente (AHMED et al., 2015b). Uma representação desse processo pode ser visualizada na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Algoritmo de inserção incremental de trajetórias. (a) Grafo existente em preto, segmentos sobrepostos em verde, e segmento novo em vermelho. (b) Grafo atualizado com o novo segmento.



Fonte: Ahmed e Wenk (2012)

2.1.3 Conexão de Interseções

Algoritmos dessa categoria se baseiam na geometria das trajetórias e pontos de conexão entre segmentos de diferentes trajetórias para identificar, inicialmente, os locais e o formato das intersecções entre trajetórias e estradas. O artigo de Fathi e Krumm (2010) foi um dos primeiros a apresentar um método desse tipo, detectando possíveis intersecções ao longo de uma trajetória para então derivar os segmentos e estradas que conectam essas intersecções a partir das trajetórias que ligam dois pontos com menor distância (AHMED et al., 2015b).

2.2 Seleção do Algoritmo

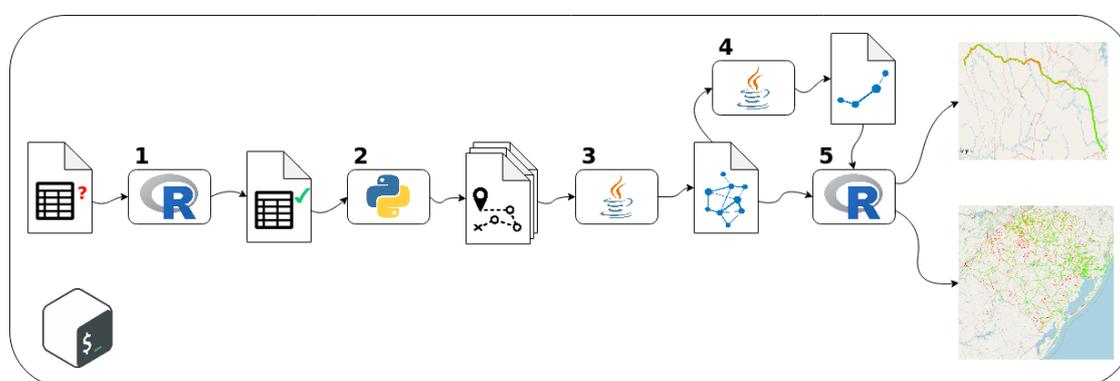
Em Ahmed et al. (2015a), os autores fazem uma comparação compreensiva e objetiva de sete algoritmos, utilizando quatro conjuntos de dados diferentes e avaliando os resultados com quatro métricas. Em resumo, os resultados destacam que, apesar de possuírem vantagens e desvantagens relevantes e mensuráveis, não há uma única abordagem que gere uma solução ótima em todos os aspectos: algoritmos de construção de mapas tendem a produzir mapas precisos com alta acurácia **ou** mapas com boa cobertura e detalhamento, mas geralmente não ambos ao mesmo tempo. Existe uma relação de compromisso entre essas duas propriedades, cabendo ao usuário compreender essa limitação e, baseado nos seus requisitos específicos, determinar o algoritmo que oferece um bom equilíbrio e atende suas necessidades.

A partir dessas considerações, bem como análises próprias do funcionamento de diferentes algoritmos e características intrínsecas dos dados de trajetórias disponíveis para nossos experimentos, o algoritmo de inserção incremental de trajetórias proposto por Ahmed e Wenk (2012) foi selecionado. Essa abordagem tem uma implementação relativamente simples e intuitiva, fazendo bom uso da natureza dos dados em questão separados em trajetórias, além de oferecer resultados com boa cobertura a custo de alguma susceptibilidade a ruídos (AHMED et al., 2015a), e garantias teóricas de qualidade baseadas na distância de Fréchet (AHMED; WENK, 2012). Outro fator contribuinte para essa decisão foi a disponibilidade do código desenvolvido por Pfoser e Wenk (2015), utilizado como base para a implementação do algoritmo para os fins deste trabalho que será descrita em detalhe no próximo capítulo.

3 CONTRIBUIÇÃO: RECONSTRUÇÃO DE MAPAS

A implementação da proposta deste trabalho¹, de reconstrução de um mapa a partir de trajetórias para análise da qualidade do sinal em rodovias, consiste em um processo organizado de forma sequencial em passos, onde a saída resultante de um passo é utilizado como entrada para o seguinte. Os cinco principais passos que constituem esse processo são: (1) tratamento inicial dos dados brutos; (2) identificação e construção das trajetórias; (3) reconstrução do mapa; (4) isolamento de rodovias; (5) geração de imagens. Todos os passos serão detalhados nas seções a seguir.

Figura 3.1 – Fluxo do processo de reconstrução do mapa.



Fonte: O Autor

Devido à natureza sequencial das etapas do processo, o mesmo foi projetado de forma modular, como um *pipeline* onde cada módulo executa uma tarefa específica, conforme ilustrado no diagrama da Figura 3.1. Dessa forma, cada módulo foi implementado independentemente utilizando uma tecnologia considerada mais apropriada para a tarefa. Os passos de tratamento de dados (1) e de geração de imagens (5) foram implementados na Linguagem R, que oferece bibliotecas poderosas para esses fins. O passo de identificação e construção das trajetórias (2) foi implementado em Python devido à sua facilidade de uso e manipulação de arquivos em alto nível. Por fim, os passos de construção do mapa (3) e isolamento de rodovias (4) foram implementados em Java, baseado da implementação de Pfoser e Wenk (2015), que oferece estruturas de dados e um sistema de classes, dando maior suporte a essas etapas mais complexas. A execução dos diferentes módulos de forma apropriada e na sequência correta é orquestrada utilizando scripts Bash.

¹O código-fonte da implementação desenvolvida neste trabalho, juntamente com um conjunto de instruções para compilação e execução para reproduzir os resultados aqui descritos, está disponível publicamente em um repositório GitHub: <https://github.com/lucasppons/Reconstrucao_Mapas_Rodoviaros>.

3.1 Tratamento dos Dados

Para o desenvolvimento do projeto, foram obtidos dados de rastreamento de uma empresa que instala e gerencia dispositivos rastreadores veiculares. Esses dispositivos transmitem, através da cobertura 2G de telefonia celular, uma atualização de sua posição geográfica juntamente com diversos outros parâmetros de controle para a central da empresa, que mantém uma base de dados desses registros.

Tal base de dados consiste em bilhões de entradas com diversos atributos, porém, para este estudo, apenas uma parcela desses dados foi utilizada. Foi extraído um subconjunto de dados suficientemente grande para obter uma distribuição espacial e temporal significativa, abrangendo toda a região do Estado do Rio Grande do Sul no período entre os anos de 2017 e 2020. O conjunto de dados final utilizado contém cerca de 40 milhões de entradas, somente com os atributos considerados necessários para este trabalho: identificador do veículo; coordenadas, latitude e longitude segundo o padrão WGS 84; data/hora de registro; e a informação de conectividade (*online* ou *offline*). A Tabela 3.1 apresenta um resumo das informações.

Tabela 3.1 – Exemplo de entradas do conjunto de dados.

ID	Latitude	Longitude	Online	Data/Hora
...
c075fa	-27,780325	-54,246227	Sim	2019-04-01 00:00:31
aad78e	-27,777540	-54,233688	Não	2019-03-14 18:05:32
d89de5	-27,780394	-54,246243	Sim	2019-07-11 11:24:43
5a8b9b	-27,780401	-54,246189	Sim	2019-08-03 04:42:54
c075fa	-27,780262	-54,246216	Sim	2019-04-01 00:01:01
...

Fonte: O Autor

3.2 Identificação de Trajetórias

Partindo dessa base de dados brutos, é necessário organizá-los em trajetórias, que serão utilizadas para o algoritmo de inserção de trajetórias. A primeira etapa para obter essas trajetórias é agrupar as entradas pelo identificador do veículo e, dentro de cada grupo, ordenar as entradas cronologicamente, conforme exemplo na Tabela 3.2. A premissa para essa estratégia é que uma trajetória consiste em uma sequência cronológica de pontos percorridos por um único veículo.

Tabela 3.2 – Exemplo de agrupamento e ordenação das entradas.

ID	Latitude	Longitude	Online	Data/Hora
...
00124e	-28,14913	-54,563858	Sim	2020-12-31 06:12:22
00124e	-28,149067	-54,563557	Sim	2020-12-31 10:13:28
00124e	-28,149048	-54,563534	Sim	2020-12-31 10:16:01
004ce8	-27,781673	-54,23716	Sim	2018-07-18 07:42:07
004ce8	-27,783869	-54,237522	Sim	2018-07-18 07:42:37
...

Fonte: O Autor

Porém, toda a sequência ordenada de pontos de um mesmo veículo não constitui uma única grande trajetória. A fim de melhor estimar trajetórias “reais”, contínuas no tempo e no espaço, foi determinado que dois pontos com distância maior que 10 min ou $0,2^\circ$ (aproximadamente 22 km)² entre si delimitam a transição entre duas trajetórias. A Tabela 3.3 apresenta um exemplo de trajetórias separadas segundo essa regra. Dessa forma, cenários como um veículo estacionado registrando periodicamente a mesma posição ou um veículo que realizou algum deslocamento com o rastreador desligado são considerados apropriadamente.

Tabela 3.3 – Exemplo de separação de trajetórias.

ID	Latitude	Longitude	Online	Data/Hora
...
00124e	-28,14913	-54,563858	Sim	2020-12-31 06:12:22
00124e	-28,149067	-54,563557	Sim	2020-12-31 10:13:28
00124e	-28,149048	-54,563534	Sim	2020-12-31 10:16:01
00124e	-28,481673	-54,53716	Sim	2020-12-31 10:22:01
00124e	-28,483869	-54,537522	Sim	2020-12-31 10:24:01
...

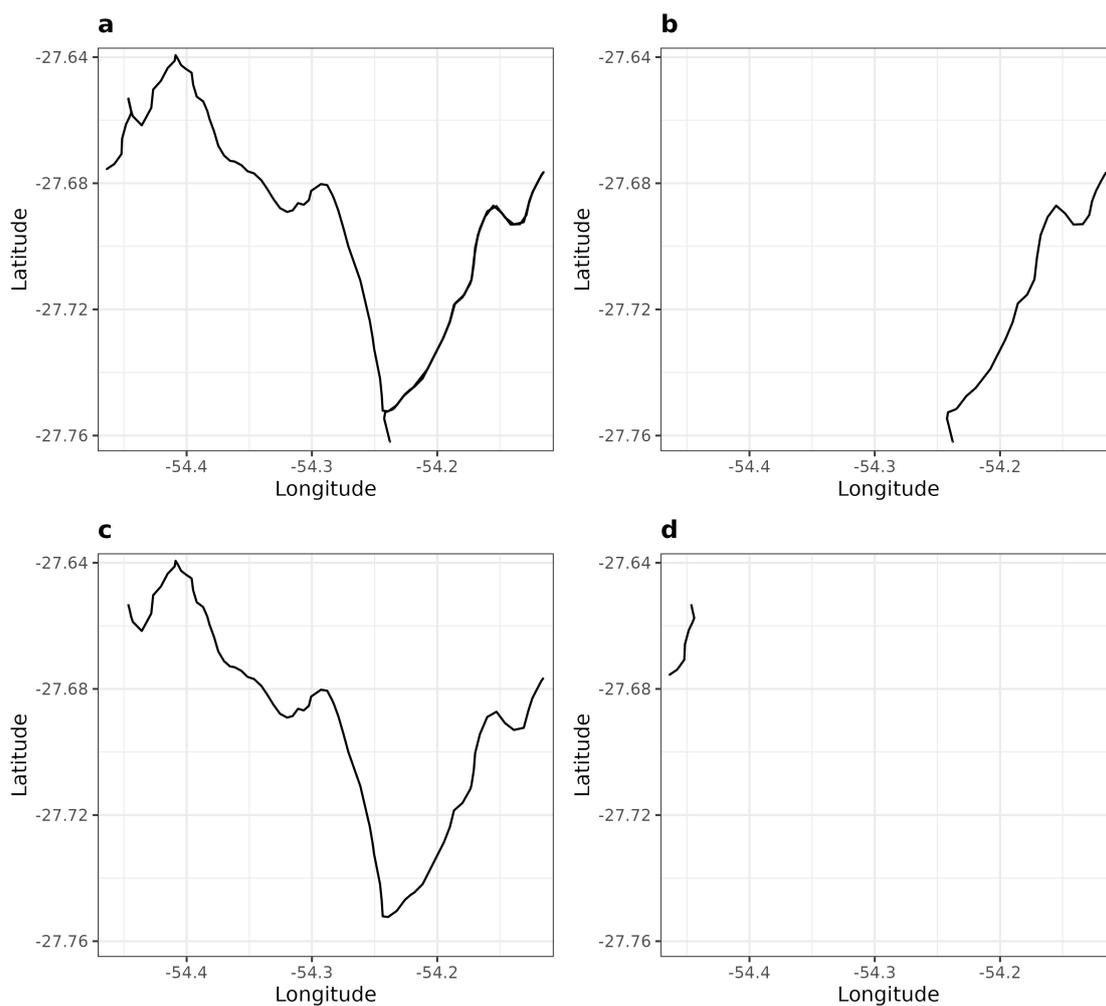
Fonte: O Autor

Por fim, devido ao funcionamento do algoritmo de inserção, trajetórias que se sobrepõem a si mesmas ou formam ciclos podem prejudicar a qualidade dos resultados, eventualmente violando as premissas assumidas pela proposta original do algoritmo em Ahmed e Wenk (2012). Tais trajetórias foram então subdivididas em trechos mais simples que evitam essas situações.

²Os parâmetros de distância para delimitar trajetórias foram estipulados de forma empírica através de experimentação e observação dos impactos nos resultados.

Para realizar essa separação, as coordenadas do retângulo que delimita a trajetória em construção são mantidas e atualizadas para cada novo ponto considerado. Quando um novo ponto não altera essas coordenadas, significa que está voltando para dentro dos limites do retângulo e possivelmente geraria algum conflito, portanto é considerado uma transição para um novo trecho. O resultado desse processo está demonstrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Separação de trajetórias. (a) Trajetória completa original. (b, c, d) Subdivisões da trajetória em trechos simples.



Fonte: O Autor

3.3 Reconstrução do Mapa com dados de Conectividade

Tendo a base de dados organizada e separada em trajetórias individuais e bem definidas (AHMED; WENK, 2012), a próxima etapa é utilizá-las para a reconstrução do mapa completo, essencialmente combinando-as para gerar um único grafo de todas as rodovias. Como mencionado anteriormente, para fins deste trabalho, foi escolhido o algoritmo de inserção incremental de trajetórias proposto em Ahmed e Wenk (2012). A implementação de tal algoritmo foi baseada na versão implementada e utilizada em Ahmed et al. (2015a), disponibilizada publicamente em Pfoser e Wenk (2015)³.

3.3.1 Funcionamento básico do algoritmo

O algoritmo de inserção incremental de trajetórias tem um processo, em alto nível, simples e intuitivo. Iniciando com um grafo vazio: para cada trajetória do conjunto, adicionar ao grafo os segmentos da trajetória que não tem nenhuma sobreposição com o grafo e descartar ou combinar os que possuem alguma sobreposição ou intersecção.

De forma mais específica, o algoritmo percorre todo o conjunto de trajetórias, executando para cada uma: correspondência parcial da trajetória com o grafo, identificando segmentos com ou sem sobreposição; inserção e conexão de seções sem sobreposição; e integração de seções com sobreposição.

No artigo original de Ahmed e Wenk (2012), todo esse processo é descrito e especificado de maneira formal, completa, detalhada e precisa matematicamente. A seguir está uma explicação simplificada, apenas com objetivo de contextualizar e esclarecer o funcionamento geral do algoritmo, para fins da sua utilização neste trabalho.

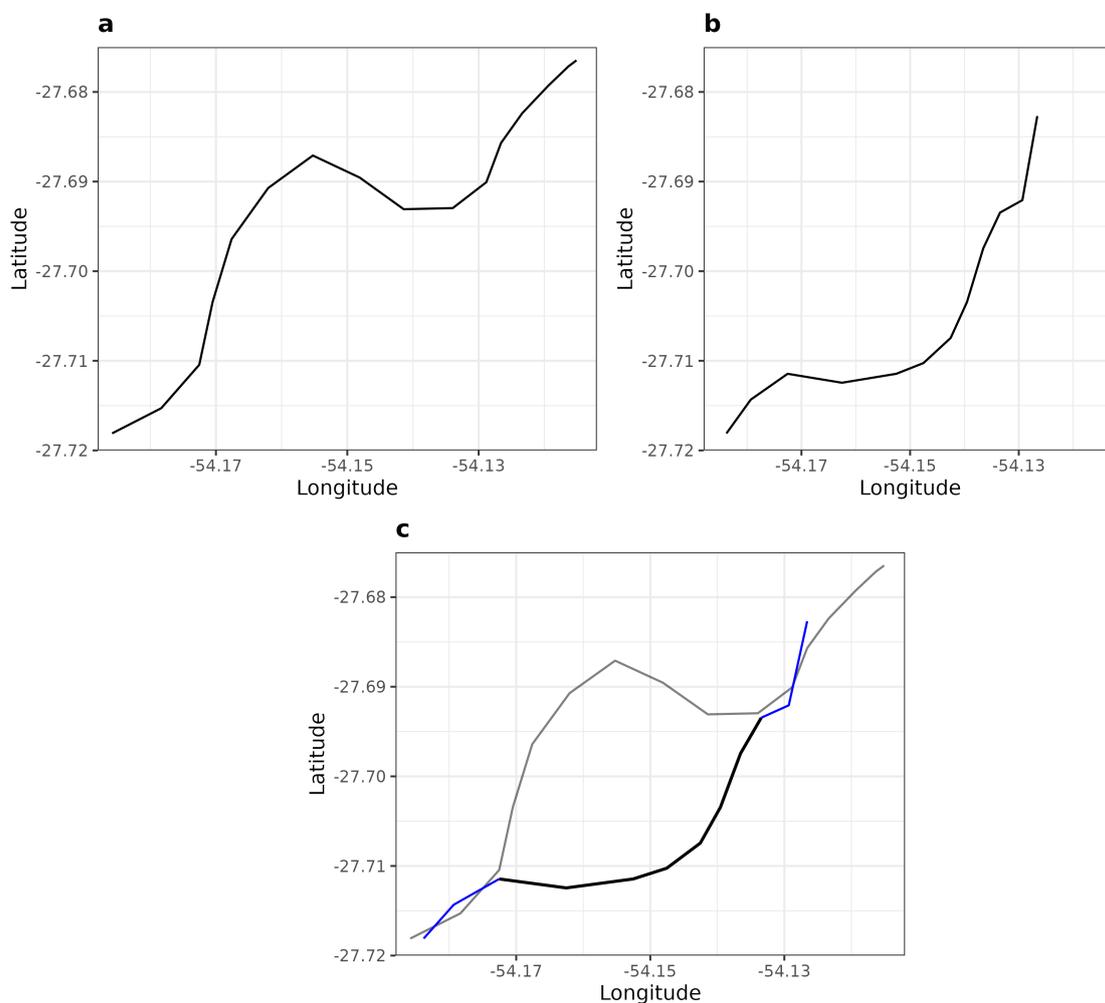
Correspondência parcial da trajetória

O primeiro passo para inserção de uma trajetória no mapa é identificar, de toda sua extensão, quais seções sobrepõem ou intersectam partes do grafo existente e quais são trechos completamente novos, conforme ilustrado na Figura 3.3.

³O código-fonte da implementação original de Pfoser e Wenk (2015) está disponível publicamente em um repositório GitHub: <<https://github.com/pfoser/mapconstruction>>.

O método para identificação é baseado na distância de Fréchet parametrizado por um limite ϵ : a distância de Fréchet é uma métrica de similaridade entre curvas (BUCHIN; BUCHIN; WANG, 2009), então trechos que possuem essa distância menor que o ponto de corte ϵ são considerados semelhantes e serão combinados com o mapa existente, enquanto trechos em que a distância é maior que ϵ são considerados independentes e serão inseridos integralmente. No contexto desse trabalho, o valor de ϵ empregado na maioria dos procedimentos foi $0,01^\circ$ (aproximadamente $1,1 \text{ km}$)⁴.

Figura 3.3 – Identificação de seções da trajetória. **(a)** Mapa existente. **(b)** Nova trajetória a ser analisada e inserida. **(c)** Sobreposição da trajetória no mapa subjacente, com as seções identificadas: com e sem sobreposição em azul e preto, respectivamente.



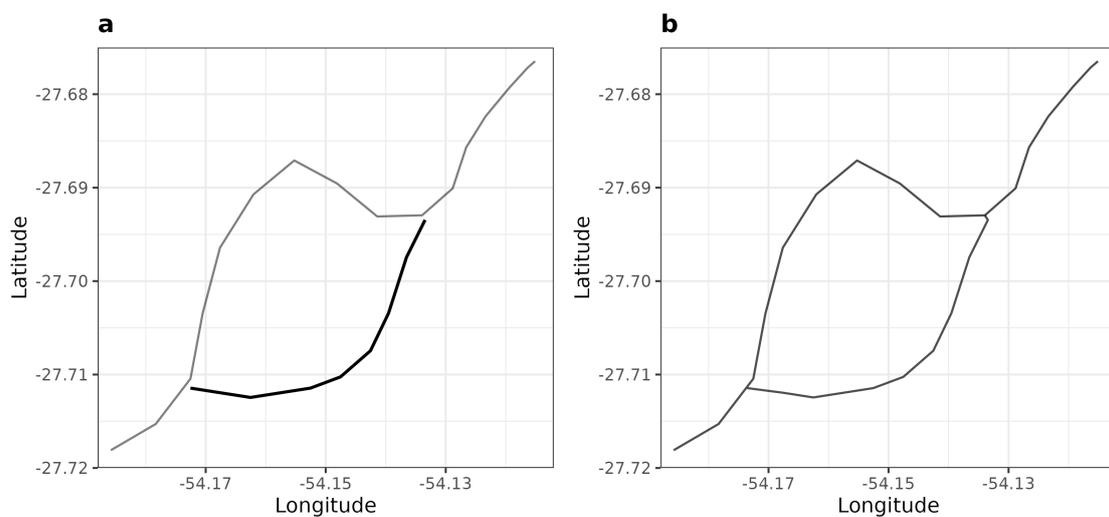
Fonte: O Autor

⁴O valor do parâmetro de limiar da distância de Fréchet ϵ , do algoritmo de inserção de trajetórias, foi estipulado de forma empírica através de experimentação e observação dos impactos nos resultados.

Inserção de seções sem sobreposição

Após a identificação apropriada das diferentes seções de uma nova trajetória, esses trechos são adicionados em sequência ao grafo. No caso de seções que não correspondem a uma parte existente do mapa (distância de Fréchet maior que ϵ), basta adicionar todos os pontos que a constituem, e ligar as extremidades a um vértice próximo ou, caso esse não exista, um novo vértice sobre uma aresta do grafo. A Figura 3.4 contém um exemplo.

Figura 3.4 – Inserção de trecho sem sobreposição. **(a)** Grafo original (em cinza) e novo trecho (em preto), antes da inserção. **(b)** Resultado da inserção, com a seção inserida e conectada.



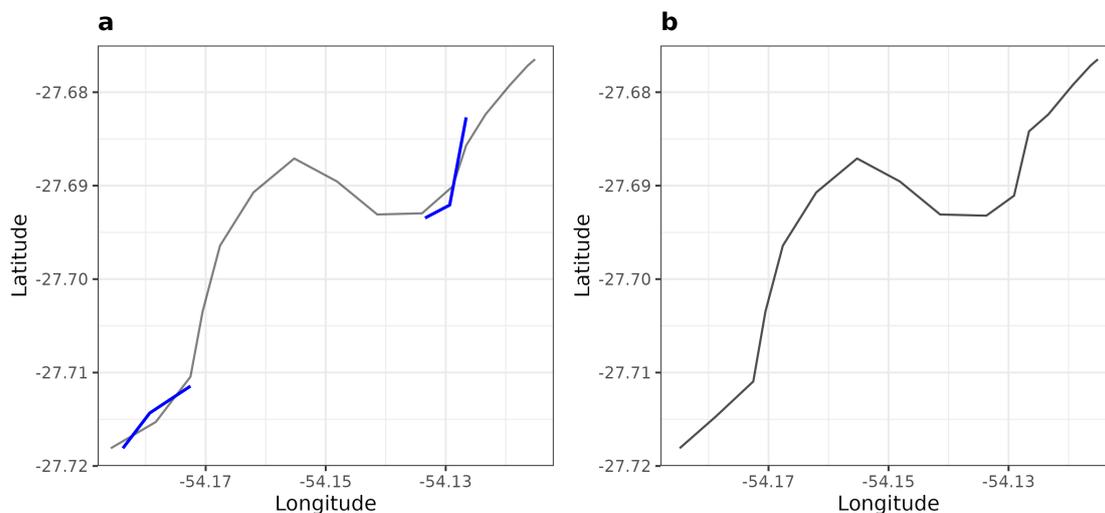
Fonte: O Autor

Integração de seções com sobreposição

No caso de seções que foram identificadas como correspondentes com alguma parte existente do grafo subjacente (distância de Fréchet menor que ϵ), existem duas abordagens possíveis: ignorar esses pontos, pois o trecho existente já é suficientemente representativo; ou realizar uma combinação dos dois segmentos, gerando um novo trecho modificado que melhor representa ambas as seções. Um exemplo está ilustrado na Figura 3.5.

A proposta original em Ahmed e Wenk (2012) implementa a segunda opção, enquanto a implementação base (PFOSER; WENK, 2015) opta pela primeira. Porém, para este trabalho, a implementação de Pfoser e Wenk (2015) foi estendida para realizar a combinação dos segmentos, além de considerar os dados de conectividade dos pontos, e se assemelha mais à original. Esse processo será detalhado na próxima subseção.

Figura 3.5 – Integração de trecho sem sobreposição. (a) Grafo original (em cinza) e novos trechos (em azul), antes da integração. (b) Resultado da integração, com os pontos do grafo alterados.



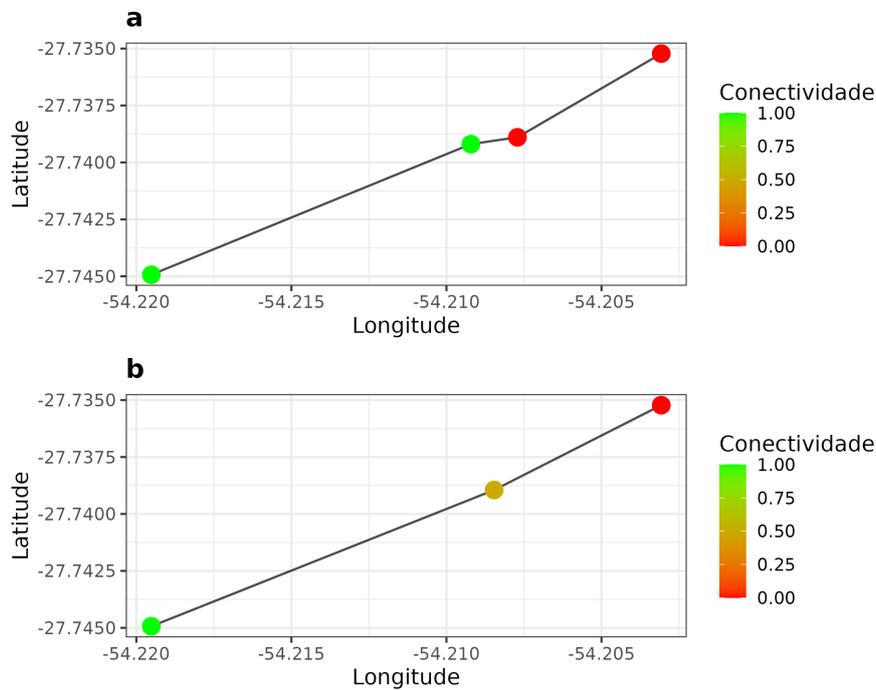
Fonte: O Autor

3.3.2 Consideração da conectividade

Tendo em vista o objetivo deste trabalho de representar e visualizar a qualidade do sinal das rodovias, a implementação básica do algoritmo (PFOSER; WENK, 2015) não possui capacidade de manter controle de metadados dos pontos, portanto precisa ser estendido para atender essa necessidade. As alterações são simples, consistem em incluir essas informações na estrutura de dados que representa os vértices e combinar a informação de pontos que seriam descartados de outra forma. No caso da conectividade do ponto, esse valor é mantido como um valor real entre zero e um. Este intervalo representa a qualidade do sinal ou a probabilidade de um ponto estar *online*, derivada da porcentagem dos pontos representados por este que foram originalmente registrados como *online*.

Na implementação original, existem duas situações em que pontos são descartados: quando existem dois pontos muito próximos, seja em uma trajetória ou no grafo final; e quando uma seção de uma trajetória é identificada como sobrepondo uma região do mapa. Em ambos os casos, a solução é gerar, a partir da interpolação desse ponto que seria descartado e outro existente mais próximo, um novo ponto que representa a combinação da localização e conectividade dos anteriores. Um exemplo desse processo se encontra na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Interpolação de dois pontos. **(a)** Trajetória original, com pontos muito próximos. **(b)** Trajetória após a interpolação, com um novo ponto intermediário combinando os dados dos pontos originais.



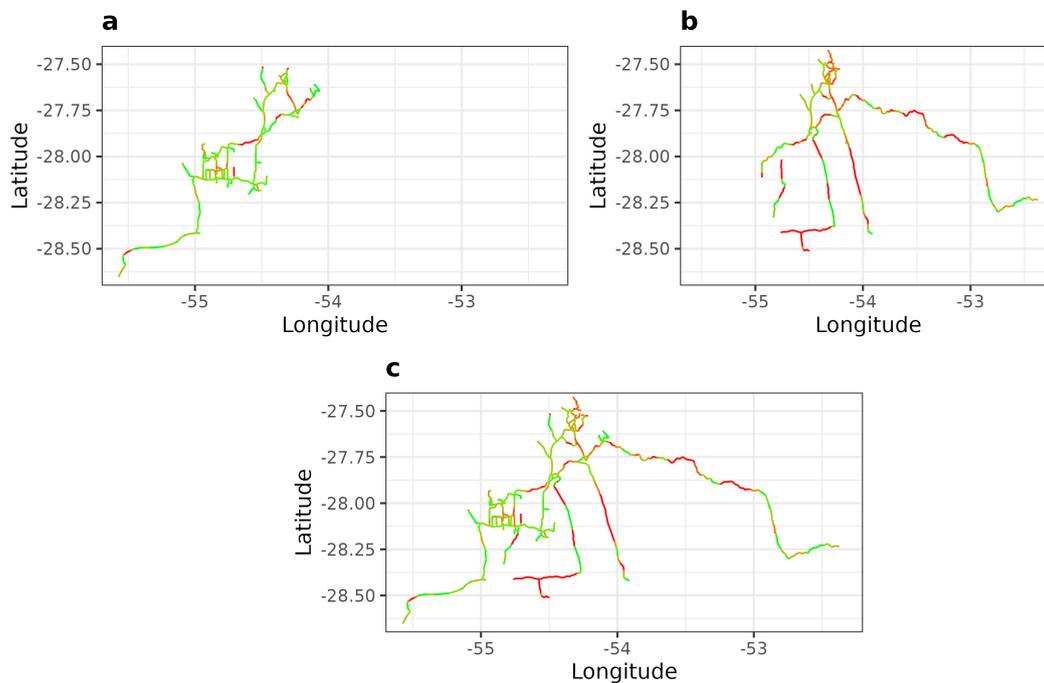
Fonte: O Autor

3.3.3 Combinação de Mapas Parciais

Devido ao grande volume de dados, gerando uma grande quantidade de trajetórias a serem inseridas, o tempo necessário para processar todo o conjunto de dados de forma estritamente sequencial se torna extremamente longo. Então uma estratégia de divisão do trabalho foi empregada: após a geração das trajetórias, vários processos de reconstrução de mapa são disparados em paralelo, arquitetados por um script Bash, cada um sendo responsável por integrar uma parcela das trajetórias em um mapa parcial.

Após o término de todos esses processos, uma versão alternativa do algoritmo de construção, que deriva as trajetórias a partir do grafo de um mapa já construído, é utilizado para combinar os mapas parciais em um mapa completo final. Um exemplo desses resultados está demonstrado na Figura 3.7. Essa abordagem causou uma drástica redução no tempo total de execução, possibilitando a realização de mais experimentos e análises dos dados em tempo hábil.

Figura 3.7 – Combinação de mapas parciais. Neste exemplo, o processamento foi dividido em dois processos paralelos. (a) Grafo parcial resultado do primeiro processo. (b) Grafo parcial resultado do segundo processo. (c) Grafo completo resultado da combinação dos mapas parciais.



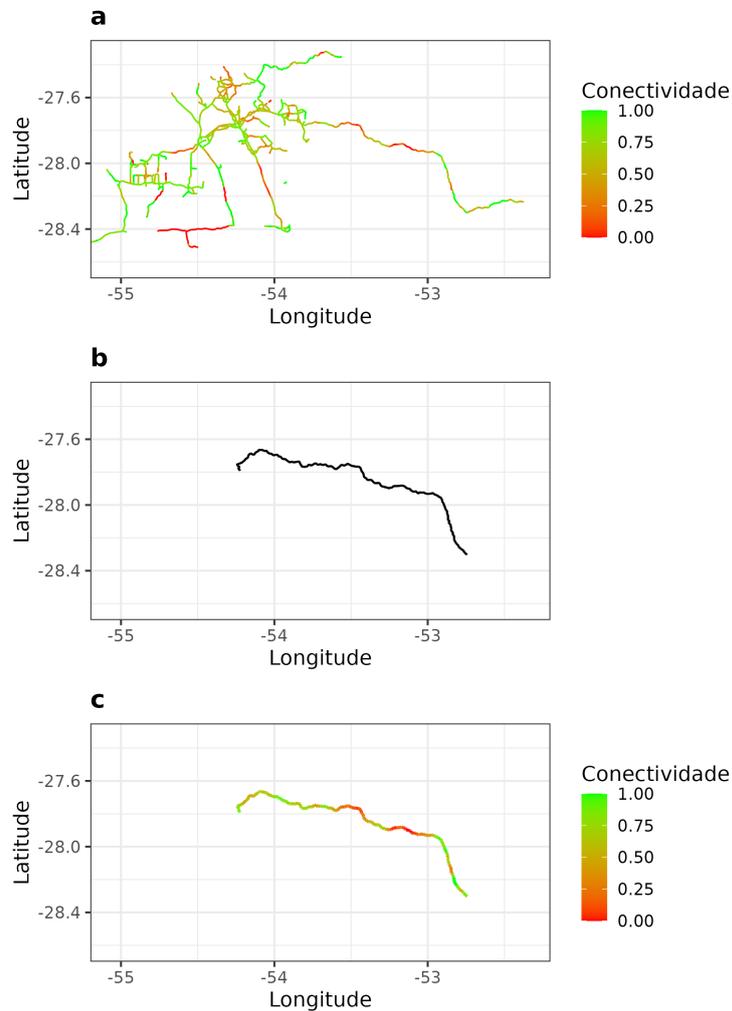
Fonte: O Autor

3.4 Consultar conectividade de uma rodovia

Como resultado do processo até esse momento, é possível obter o mapa completo de toda a região que engloba as trajetórias utilizadas, incluindo as informações de qualidade de sinal. Com isso, já é possível realizar análises sobre a conectividade das rodovias e enxergar de forma panorâmica o estado da cobertura e qualidade da rede sobre uma malha rodoviária. Porém, uma visualização mais detalhada e específica de uma única rodovia ou um trecho de estrada, por exemplo, pode oferecer melhor visibilidade.

Essa funcionalidade foi implementada como uma variação do algoritmo base de inserção de trajetórias. O processo funciona basicamente de forma contrária ao original: a partir de um mapa existente e uma trajetória, ao invés de utilizar os dados dessa trajetória para incrementar e enriquecer o mapa, os dados do mapa são utilizados para projetar as informações desejadas sobre os pontos da trajetória. Dessa forma, tendo o mapa resultado do passo anterior, basta gerar trajetórias com as geometrias das rodovias desejadas, que serão então enriquecidas com os dados de qualidade do sinal, contidos no mapa reconstruído. Uma ilustração desse processo se encontra na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Isolamento da trajetória de uma rodovia. **(a)** Mapa completo reconstruído. **(b)** Geometria original da trajetória, representando um trecho de rodovia. **(c)** Resultado do isolamento, a trajetória da rodovia enriquecida com os dados de conectividade extraídos do mapa.

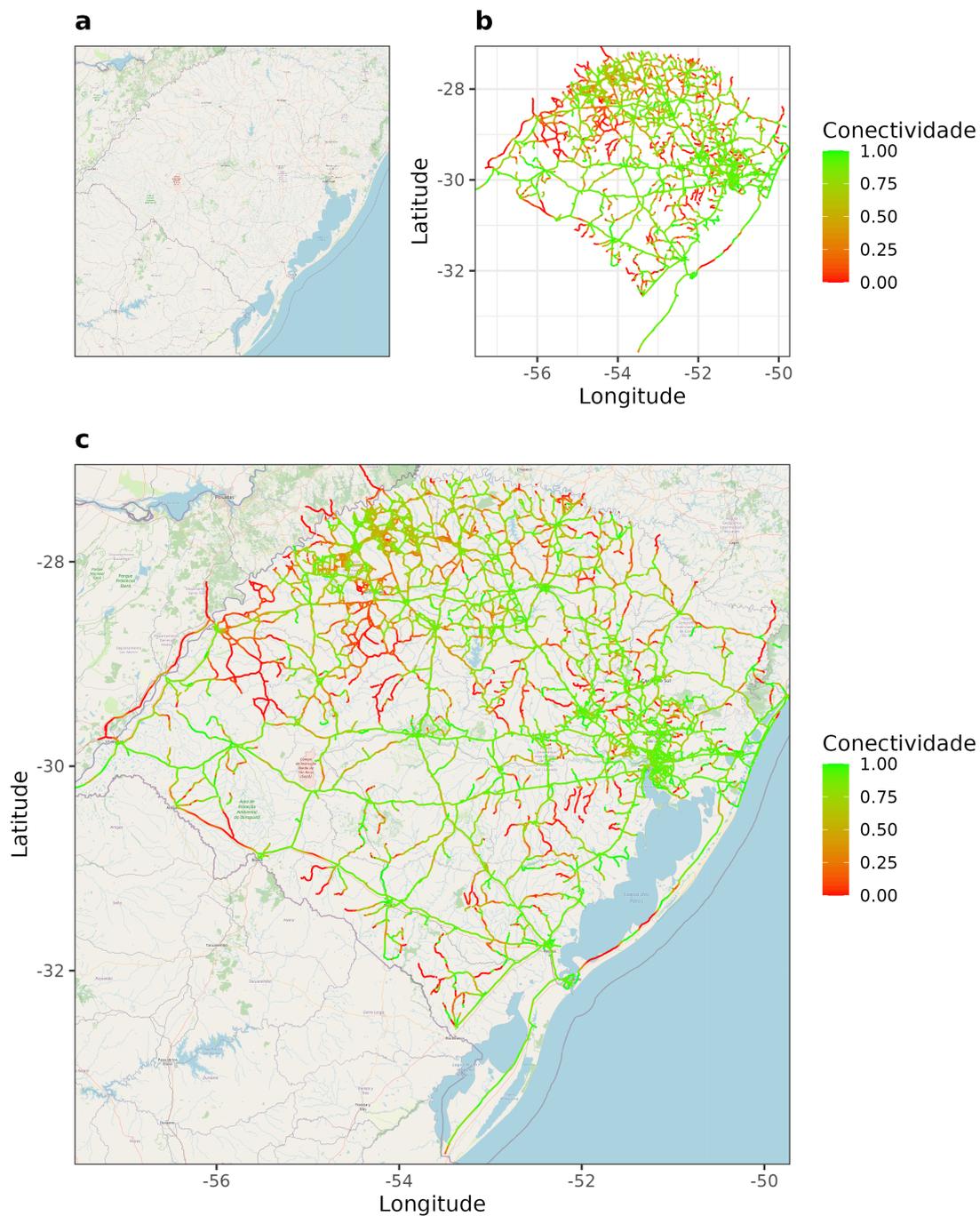


Fonte: O Autor

3.5 Geração de Imagens

Por fim, o último passo para gerar mapas rodoviários para visualização e análise da informação de conectividade das estradas é projetar o grafo enriquecido produzido nos passos anteriores em uma representação cartográfica da região, colocando o mapa em seu contexto. No âmbito deste trabalho, o conjunto de dados de rastreamento contém pontos em toda a extensão do Rio Grande do Sul, então uma imagem dessa região foi gerada utilizando a ferramenta OSM, disponibilizada pela OSMF (OpenStreetMap Foundation, 2023), que utiliza o sistema de referência geodésica WGS 84 compatível com as coordenadas GPS da base de dados. A Figura 3.9 apresenta o resultado desse processo.

Figura 3.9 – Geração da imagem final do mapa reconstruído. (a) Imagem base, gerada utilizando OSM. (b) Grafo do mapa reconstruído. (c) Projeção do grafo na imagem base, resultado no mapa contextualizado.

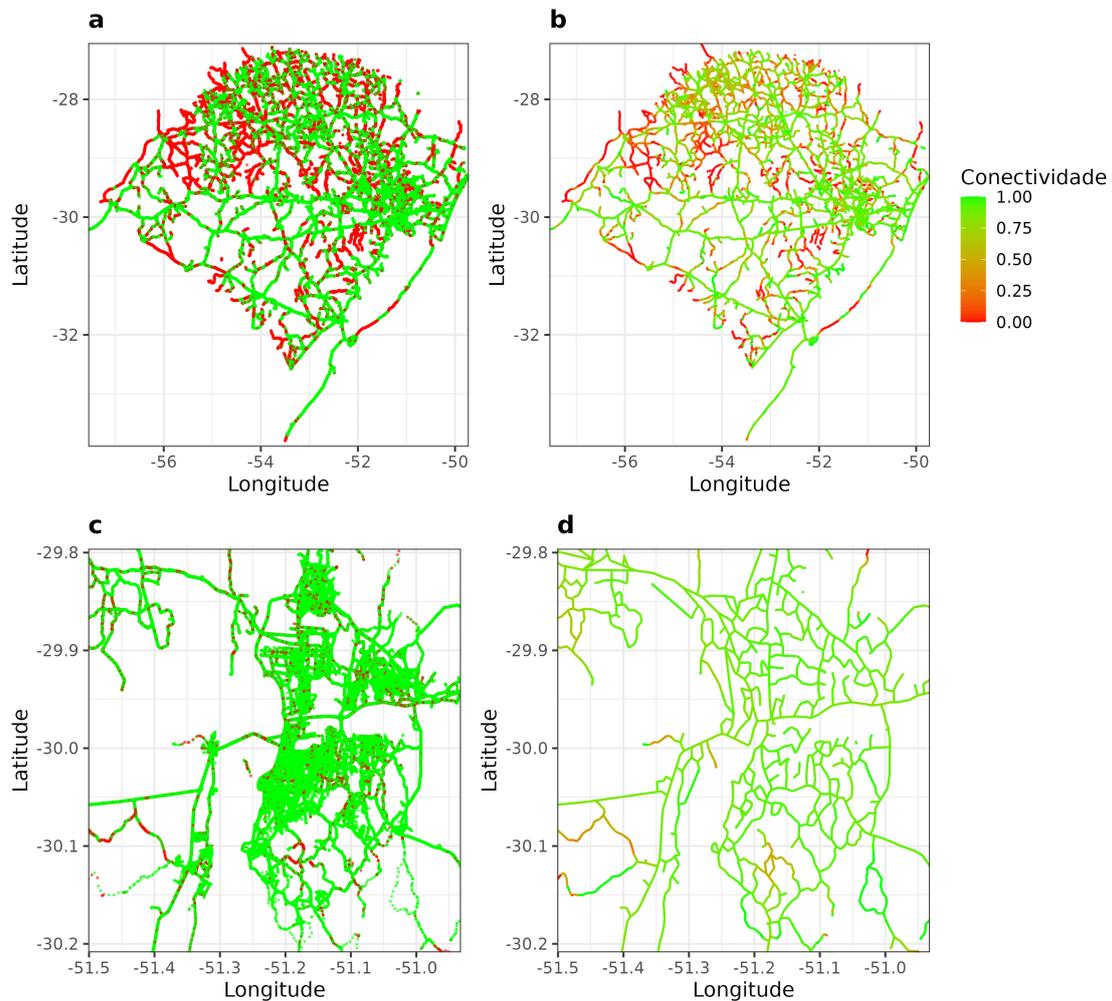


Fonte: OpenStreetMap Foundation (2023); O Autor

4 RESULTADOS E ANÁLISE

O mapa rodoviário resultante do processo de reconstrução, bem como a estrutura de grafo subjacente, têm a responsabilidade de representar de forma precisa e resumida o conjunto de dados original de pontos de rastreamento de veículos. Também é necessário que a geometria das rodovias modele a estrutura rodoviária da região com certa acurácia, para que se constitua uma ferramenta confiável para consulta e análise dos dados de localização e conectividade.

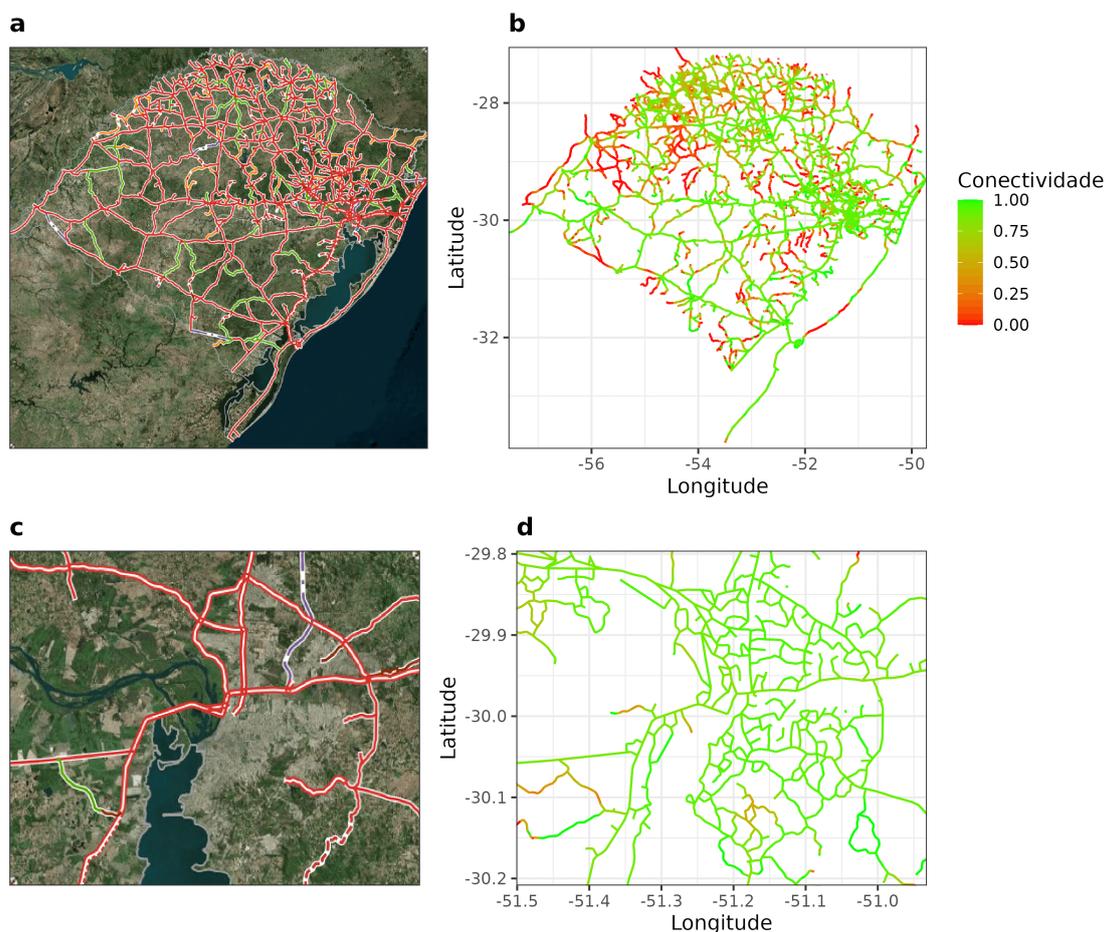
Figura 4.1 – Comparação entre os pontos originais e o mapa reconstruído. **(a)** Plot dos pontos originais completo. **(b)** Plot do grafo reconstruído completo. **(c)** Plot dos pontos originais, amplificado na região de Porto Alegre. **(d)** Plot do grafo reconstruído, amplificado na região de Porto Alegre.



Fonte: O Autor

Como pode ser observado na Figura 4.1, uma análise visual e holística aponta que o grafo resultante representa de forma adequada a base de dados original. Como os dados originais possuem apenas um valor binário representando a conectividade, os pontos são coloridos somente com as cores limite verde e vermelho, enquanto o grafo reconstruído deriva esse atributo como um valor real representando uma probabilidade, por isso a coloração abrange todo o espectro. Já a Figura 4.2 demonstra, também a partir de comparação visual, que o grafo gerado também modela aproximadamente a malha rodoviária oficial da região, obtida utilizando a plataforma de Mapa Rodoviário Interativo disponibilizada pelo DAER (DAER RS, 2019), de forma apropriada.

Figura 4.2 – Comparação entre a malha rodoviária real e o mapa reconstruído. (a) Malha rodoviária do Rio Grande do Sul. (b) Plot do grafo reconstruído completo. (c) Malha rodoviária da região de Porto Alegre. (d) Plot do grafo reconstruído, amplificado na região de Porto Alegre.



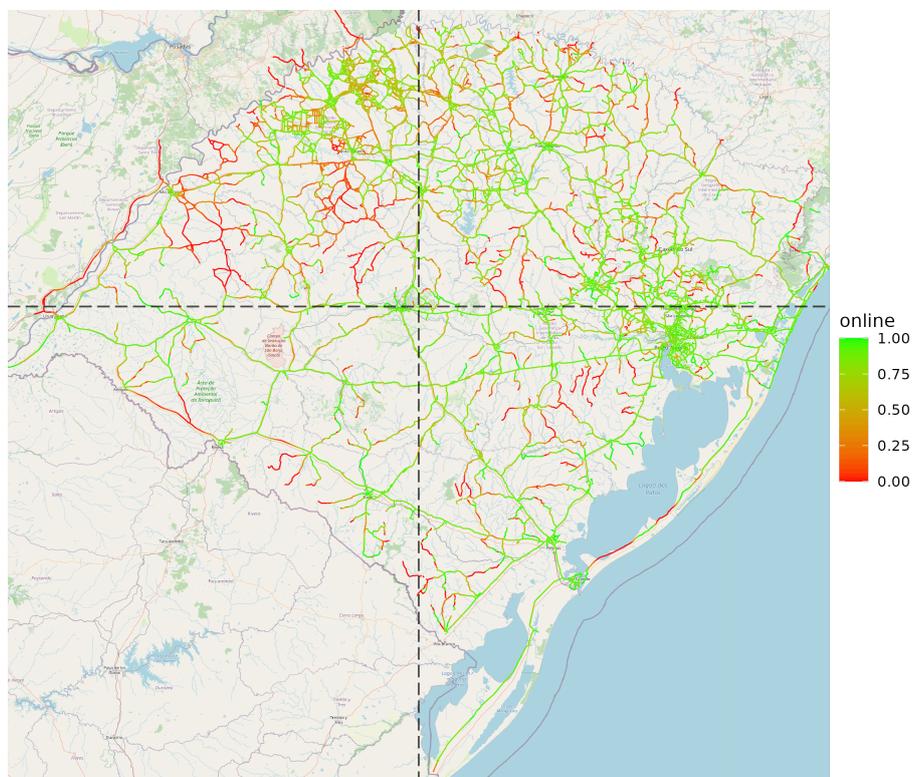
Fonte: DAER RS (2019); O Autor

Uma vez estabelecido que o processo gera resultados suficientemente representativos e consistentes tanto com os dados de rastreamento quanto com o mapa rodoviário, é possível analisar as características representadas visualmente no mapa reconstruído para derivar observações sobre a conectividade disponível nas estradas. Aplicando diferentes filtros aos dados na primeira etapa de tratamento ou seccionando a imagem do mapa gerado, pode-se montar cenários de comparação entre diferentes atributos. Algumas dessas análises comparativas serão apresentadas a seguir.

4.1 Análise da conectividade

Primeiramente, apenas observando o mapa completo da Figura 4.3, é possível avaliar visualmente a situação da conectividade em toda a malha rodoviária do Rio Grande do Sul de forma geral. Esse mapa poderia ser utilizado diretamente para consultas rápidas e fácil visualização da qualidade do sinal em uma região ou estrada.

Figura 4.3 – Mapa reconstruído completo, dividido em regiões simplificadas. Utilizado como base para as análises de conectividade.



Fonte: O Autor

4.1.1 Análise relativa à geografia

Observando mais atentamente as regiões delimitadas no mapa da Figura 4.3 pode-se estimar que existe uma diferença na disponibilidade de sinal entre as diferentes regiões do Estado. Principalmente na região noroeste do Estado, entre as cidades de Alegrete, São Borja e Ijuí, que em contraste com a região sudeste do Estado que engloba a capital e aparenta possuir boa cobertura, é uma grande área majoritariamente colorida em vermelho, representando baixa conectividade na região. A Tabela 4.1 apresenta a média dos valores de conectividade, expressa em porcentagem, para cada região do mapa, comprovando numericamente o que foi observado visualmente, apesar de não ser uma diferença tão drástica quanto o mapa transparece.

Tabela 4.1 – Valor médio da conectividade, em porcentagem, por região.

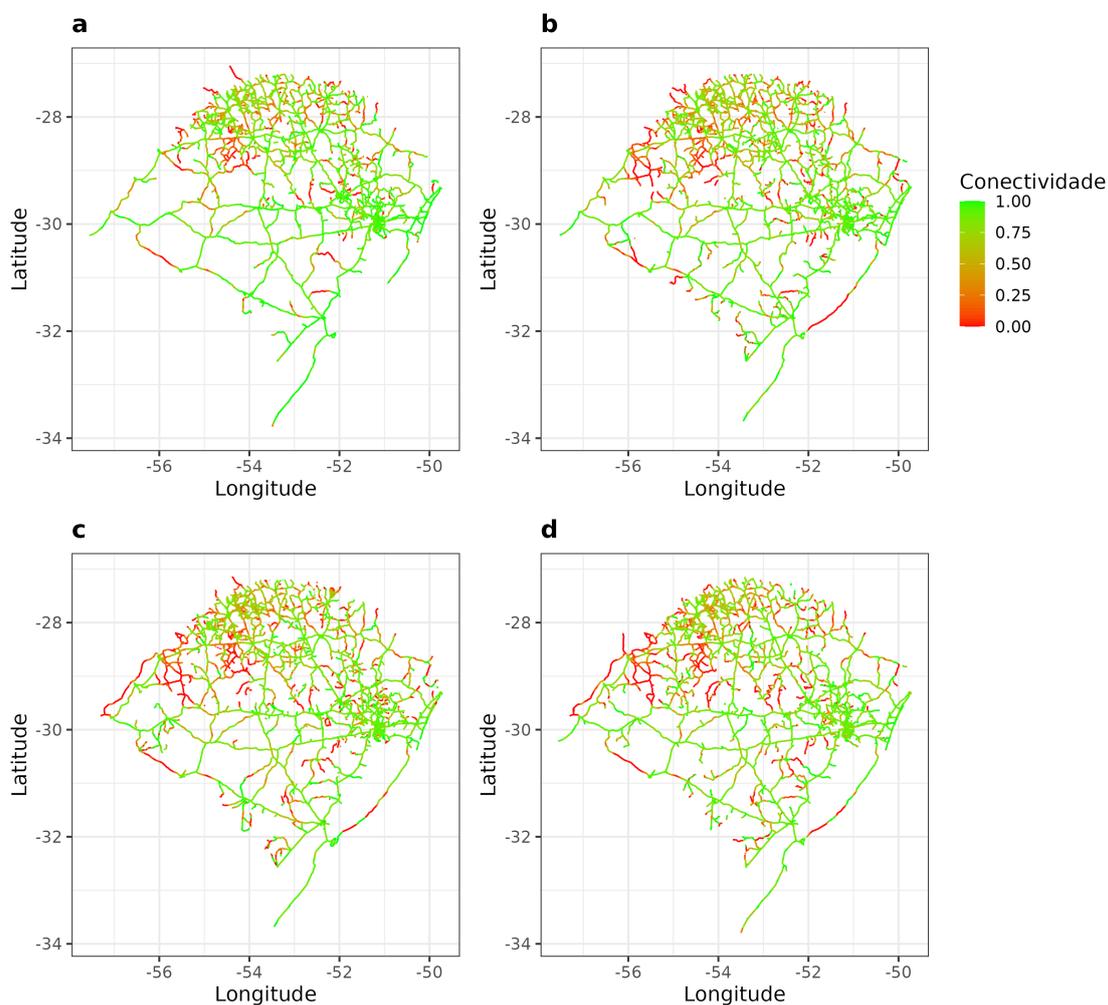
Região	Conectividade Média
Nordeste	65,6%
Noroeste	51,5%
Sudoeste	68,4%
Sudeste	72,1%

Fonte: O Autor

4.1.2 Análise relativa ao tempo

Como o conjunto de dados original de rastreamento abrange um largo intervalo de tempo, uma comparação possivelmente interessante é de como a qualidade do sinal nas rodovias evoluiu ao longo dos anos. Os dados abrangem os anos de 2017 a 2020, logo foram divididos em quatro subconjuntos, um para cada ano, que foram submetidos separadamente ao processo de construção, gerando os quatro mapas comparados na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Evolução da conectividade no tempo. (a) Mapa dos dados de 2017. (b) Mapa dos dados de 2018. (c) Mapa dos dados de 2019. (d) Mapa dos dados de 2020.



Fonte: O Autor

Analisando os resultados para cada ano, não se observam muitas diferenças entre as imagens, além de uma possível queda de qualidade entre os anos de 2018 e 2019, onde percebem-se algumas regiões em tons mais amarelados. A Tabela 4.2 demonstra a média dos valores de conectividade para cada ano e corrobora com a percepção visual. Esse tipo de análise pode ser útil para as empresas provedoras de acesso à internet responsáveis pela cobertura dessas regiões, oferecendo um método de controle da operação, eventualmente auxiliando a orientar os esforços da empresa ou mesmo servir como um artefato de evidência para algum tipo de vistoria.

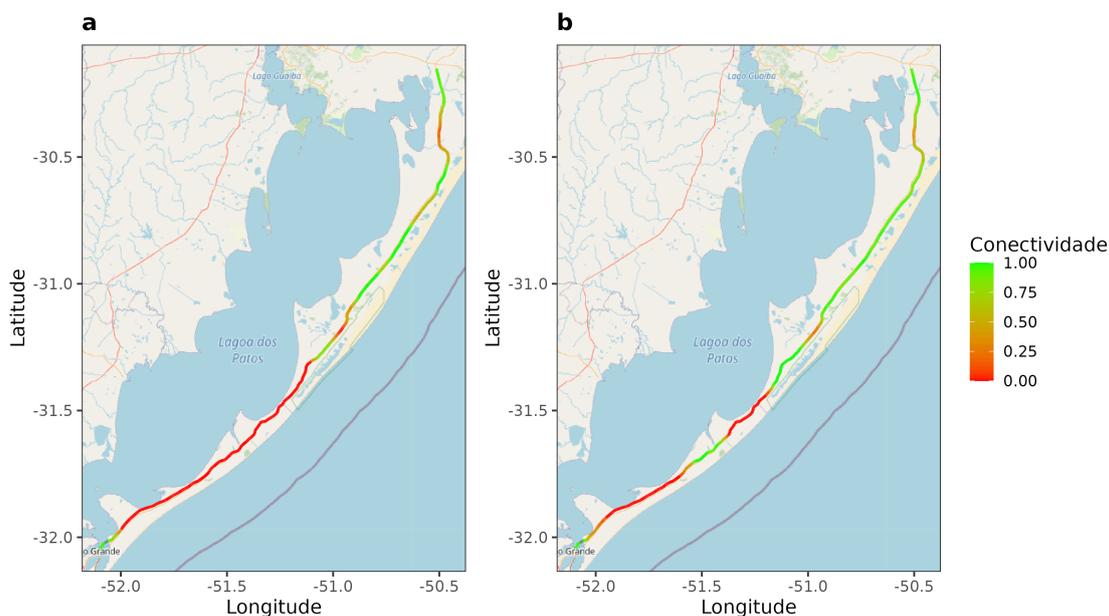
Tabela 4.2 – Valor médio da conectividade, em porcentagem, por ano.

Ano	Conectividade Média
2017	82,4%
2018	78,6%
2019	74,1%
2020	75,7%

Fonte: O Autor

Existem algumas “lacunas” na visualização do ano de 2017, devido a características intrínsecas do conjunto de dados desse ano, que possui menor volume de dados e não cobre certas rodovias. Além disso, uma das únicas alterações visivelmente perceptíveis é a evolução da cobertura do trecho da BR-101 entre Capivari do Sul e Rio Grande, no litoral do Estado. A Figura 4.5 destaca essa diferença, utilizando a ferramenta de consulta de rodovia para gerar imagens detalhadas desse trecho nos anos de 2018 e 2020.

Figura 4.5 – Diferença da conectividade da BR-101 entre 2018 e 2020. (a) Mapa do trecho da BR-101 no período do ano de 2018. (b) Mapa do trecho da BR-101 no período do ano de 2020.

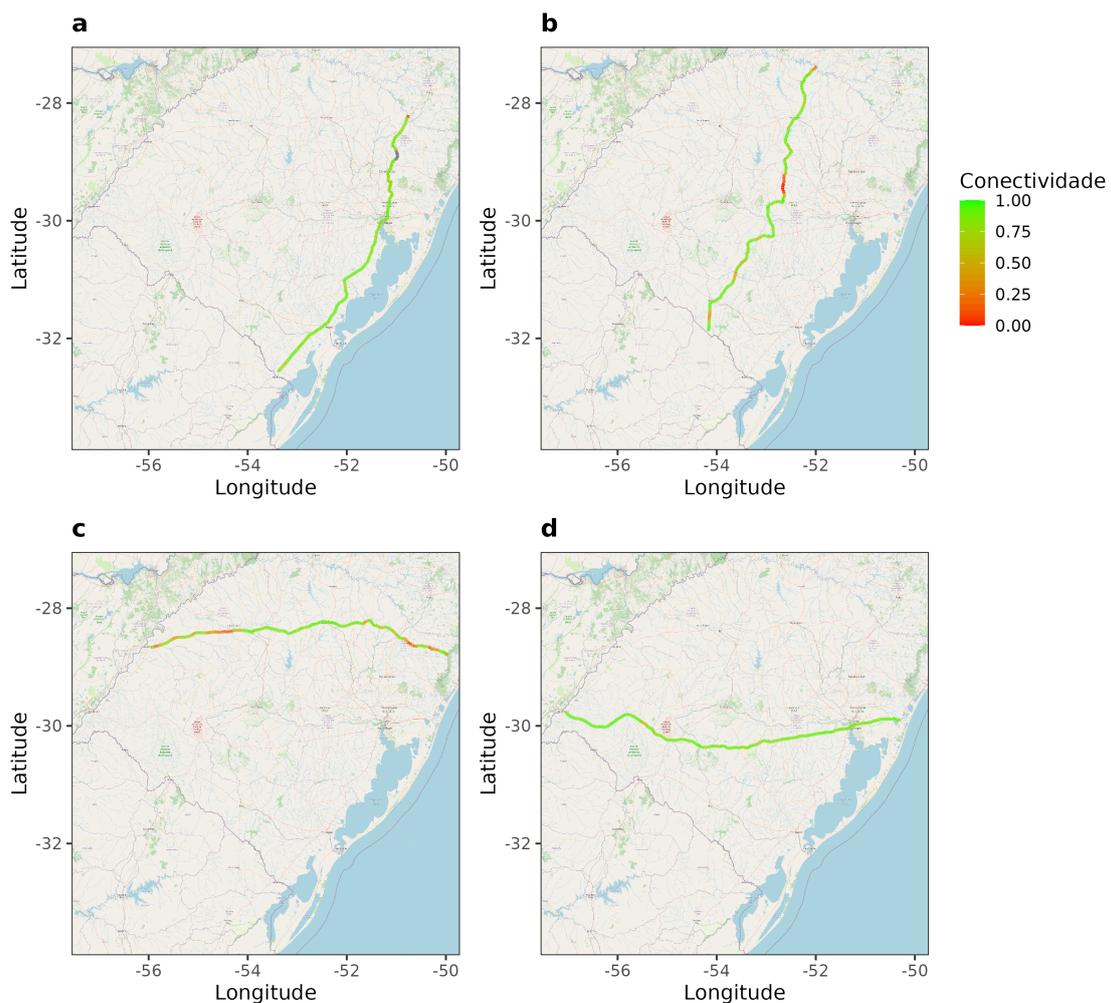


Fonte: O Autor

4.1.3 Análise relativa a rodovias

Assim como no exemplo da BR-101 na seção anterior, a ferramenta de consulta de rodovias pode ser utilizada para estruturar comparações entre diferentes rodovias específicas pertencentes ao mapa. Por exemplo, na Figura 4.6 pode-se visualizar uma comparação entre algumas das principais rodovias do estado: BR-116, BR-153, BR-285 e BR-290. Esse tipo de comparação pode ser utilizado por empresas transportadoras e de rastreamento, auxiliando na estimativa de melhores rotas ao adicionar a informação de conectividade dos trechos de estradas como um fator relevante, além da distância e tempo de percurso.

Figura 4.6 – Visualização da conectividade de rodovias. (a) Mapa da rodovia BR-116. (b) Mapa da rodovia BR-153. (c) Mapa da rodovia BR-285. (d) Mapa da rodovia BR-290.

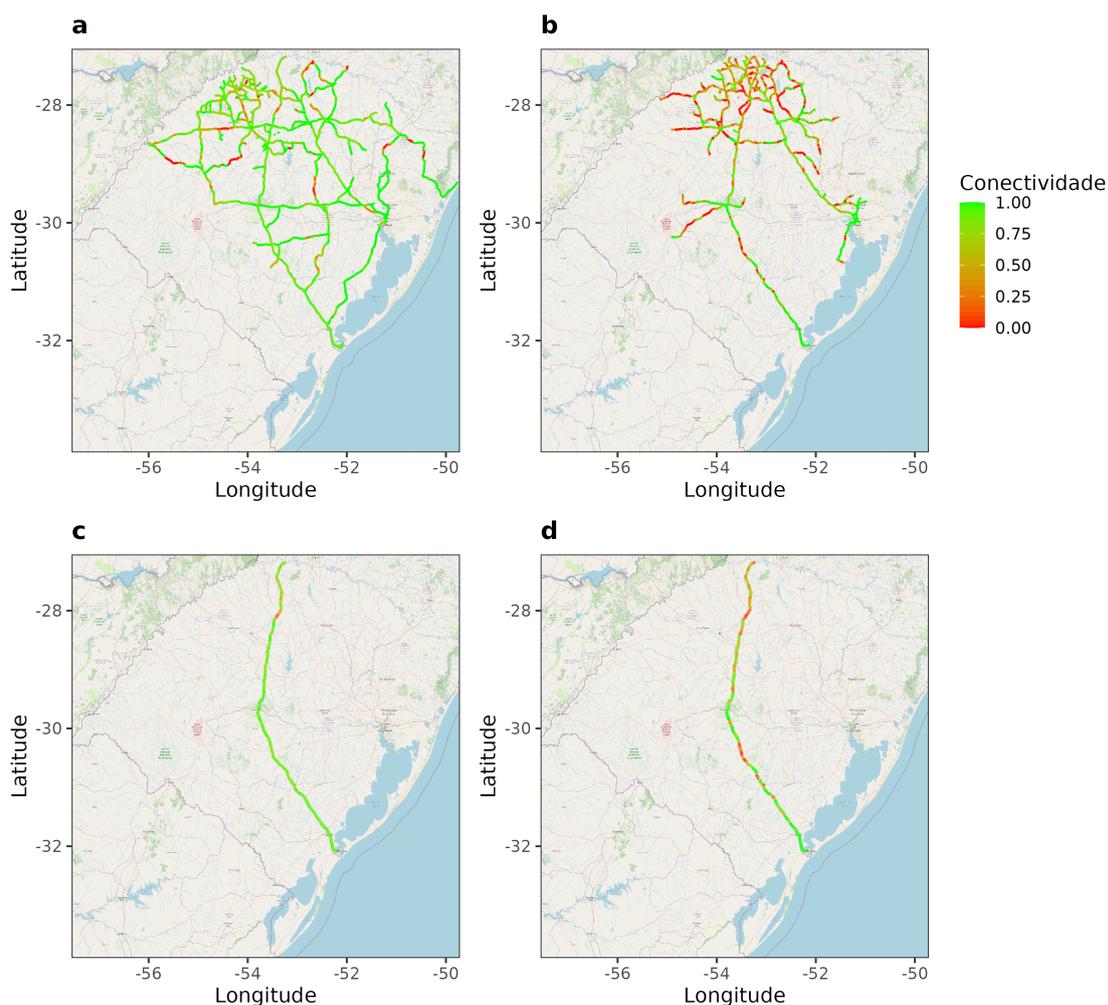


Fonte: O Autor

4.1.4 Análise relativa a veículos

Até o momento, todas as análises foram feitas considerando que a razão para a variação na conectividade seria a qualidade da infraestrutura da rede e o suporte e cobertura oferecidos pelas operadoras. No entanto, outro fator importante a ser considerado quando avaliando esses mapas de conectividade são os dispositivos rastreadores instalados nos veículos, que geraram os dados brutos. Dispositivos incapazes de fazer uso do sinal 2G, ou com seu funcionamento comprometido por algum outro motivo, podem gerar dados que não são representativos do estado da infraestrutura, mas sim do seu próprio, e influenciar erroneamente as estatísticas derivadas sobre a conectividade.

Figura 4.7 – Comparação dos dados de conectividade de veículos. (a) Mapa de conectividade do veículo A. (b) Mapa de conectividade do veículo B. (c) Mapa de conectividade de uma rota segundo dados do veículo A. (d) Mapa de conectividade de uma rota segundo dados do veículo B.



A Figura 4.7 apresenta a comparação dos dados de conectividade gerados por dois veículos diferentes, abrangendo intervalos similares de tempo e espaço. Pode-se observar que os resultados são inconsistentes, e como o veículo B é o que difere mais do comportamento médio representado na Figura 4.3, poderia ser identificado como avariado. Essa diferença pode ser observada mais claramente nas imagens que comparam apenas uma rota, onde o veículo B reportou valor médio de conectividade de 65,3%, comparado a 86,9% do veículo A. Isso pode ser muito útil, novamente, para empresas transportadoras ou de rastreamento, pois facilita a identificação de dispositivos rastreadores defeituosos que devem sofrer manutenção ou substituição.

4.2 Discussão sobre desempenho e eficiência

Na Subseção 3.3.3 o problema do grande tempo de processamento necessário para processar todo o conjunto de dados foi brevemente mencionado como motivador para a implementação do procedimento de combinação de mapas parciais. Agora esse assunto será abordado com maior detalhamento. A Tabela 4.3 apresenta tempos reais reportados durante a execução dos experimentos ao longo do trabalho, utilizando o valor do parâmetro $\epsilon = 0,01^\circ$, para diferentes volumes de dados brutos, antes e depois das otimizações implementadas. A versão otimizada foi executada com seis processos paralelos.

Tabela 4.3 – Tempo de execução para diferentes volumes de dados.

Nº de Entradas	Tempo de Execução Original	Tempo de Execução Otimizado
10.000	6,5s	1,7s
100.000	2min 57s	10,9s
1.000.000	2h 30min	2min 24s
40.000.000	> 72h	6h 30min

Fonte: O Autor

Como se pode observar, as otimizações implementadas causaram impacto expressivo no tempo de execução do algoritmo de reconstrução do mapa. O tempo de mais que 72h na última linha significa que o processo permaneceu executando por 72 horas ininterruptamente e foi interrompido nesse momento, pois ainda não havia processado metade dos dados. O tempo de 6h 30min para processar a integridade do conjunto de dados ainda é considerável, principalmente pelo fato de que esse conjunto de 40 milhões de dados é uma amostra da base de dados original da empresa que contém bilhões de entradas, porém foi considerado satisfatório para atingir os objetivos deste trabalho em tempo hábil.

Considerando que um dos objetivos da proposta deste trabalho é a condensação da informação, através da combinação de milhares de trajetórias em um único grafo representativo, também é interessante fazer uma análise sobre a redução de densidade de pontos utilizados. Além disso, é importante entender como o parâmetro ϵ do algoritmo de inserção de trajetórias influencia esse resultado e os mapas gerados. A Tabela 4.4 apresenta essa comparação de densidades, de acordo com o valor de ϵ .

Tabela 4.4 – Redução de densidade de pontos de acordo com o valor de ϵ .

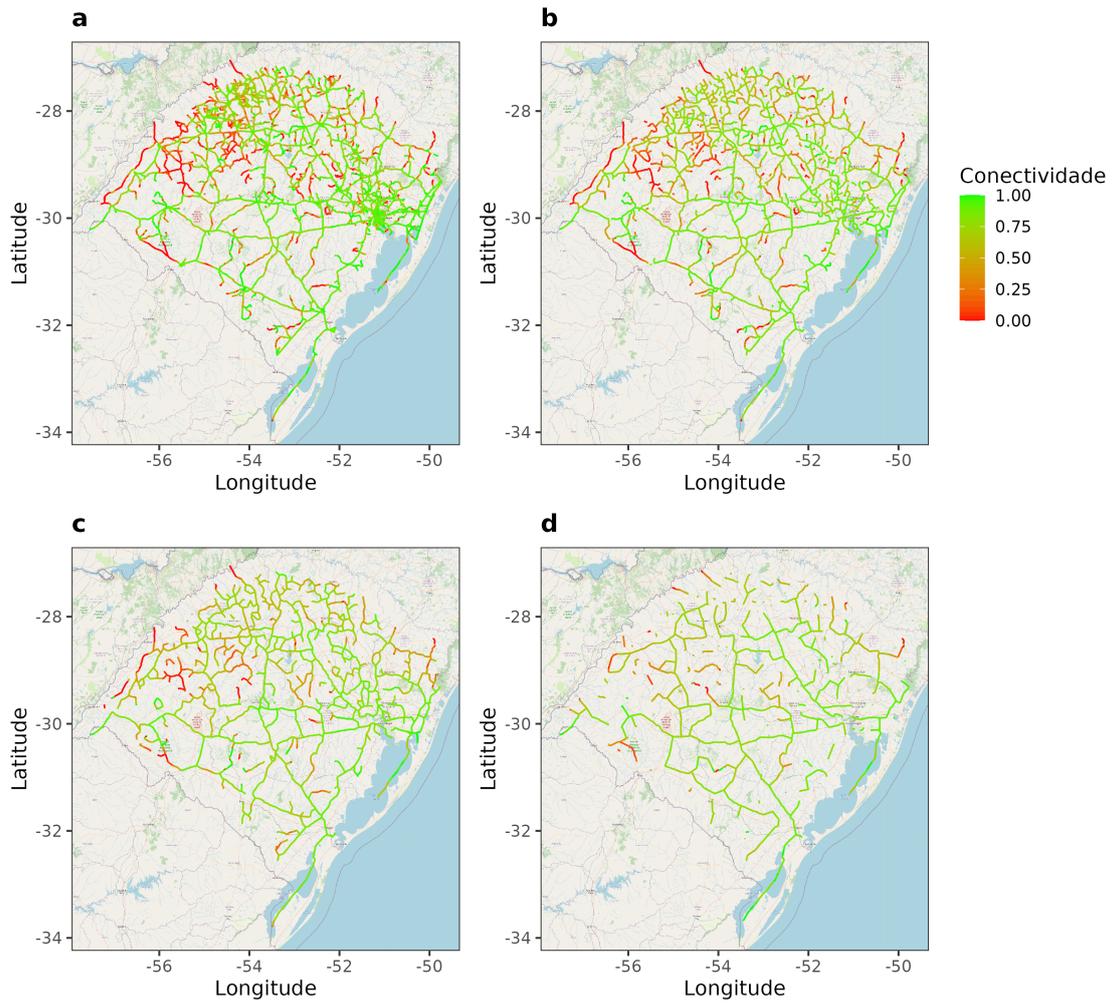
ϵ	Nº de Pontos Original	Nº de Pontos Resultante	Redução
0,01°	10.000.000	27.750	99,72%
0,05°	10.000.000	13.250	99,87%
0,1°	10.000.000	7.600	99,92%
0,2°	10.000.000	4.230	99,96%

Fonte: O Autor

Como se pode observar, quanto maior o valor de ϵ , menos pontos constituem o grafo gerado. Isso acontece porque ϵ funciona como uma medida de tolerância para a combinação de trajetórias. Quando essa tolerância é maior, o critério de semelhança entre trajetórias é menos estrito, então mais trajetórias são combinadas com trechos existentes ao invés de adicionadas ao grafo.

Como o grafo contém menos pontos durante o processo, a reconstrução do mapa com valores mais altos de ϵ também leva menos tempo, mas ao custo de gerar mapas com menor “resolução”, menos detalhados. A Figura 4.8 apresenta os mapas gerados utilizando os mesmos dados e valores de ϵ de acordo com a Tabela 4.4, demonstrando a diferença do nível de detalhe entre os mapas.

Figura 4.8 – Diferença dos mapas gerados com diferentes valores de ϵ . (a) Mapa gerado com $\epsilon = 0,01^\circ$. (b) Mapa gerado com $\epsilon = 0,05^\circ$. (c) Mapa gerado com $\epsilon = 0,1^\circ$. (d) Mapa gerado com $\epsilon = 0,2^\circ$.



Fonte: O Autor

5 CONCLUSÃO

O sistema projetado e implementado ao longo deste trabalho, apresentado nos capítulos anteriores, é capaz de construir grafos anotados que representam a malha rodoviária de uma região, considerando e ilustrando a situação da qualidade do sinal e cobertura 2G ao longo das estradas. O algoritmo utilizado para reconstrução dos mapas, conforme proposto por Ahmed e Wenk (2012), emprega a estratégia de inserção parcial de trajetórias, e a implementação original de Pfoser e Wenk (2015) foi otimizada e estendida para comportar os dados de conectividade.

O produto final do processo, os mapas rodoviários reconstruídos com dados de conectividade, é uma representação completa do conjunto de dados de rastreamento, e oferece uma visualização gráfica simples, intuitiva e eficaz para as condições de conectividade e qualidade do sinal nas rodovias. Além disso, é uma ferramenta modular e flexível, podendo ser parametrizada de forma a gerar mapas adequados para diferentes casos de uso.

Como exemplificado na Seção 4.1, um analista pode reconstruir diversas combinações de mapas, com objetivos de análise de atributos ou características distintas, como por exemplo: uma visão geral do estado da rede através do mapa completo; visualização da evolução da qualidade do sinal ao longo do tempo; identificação de dispositivos possivelmente defeituosos; e consulta aos dados de conectividade específicos de uma estrada ou rota.

Assim, os objetivos da proposta deste trabalho foram atingidos, e os procedimentos e resultados descritos neste documento podem ser aproveitados, por exemplo, por empresas transportadoras ou de rastreamento para aprimorar o controle sobre sua frota, ou pelas empresas responsáveis por prover a rede 2G nas rodovias como um artefato para auxiliar a avaliação e planejamento de seus esforços para expandir sua cobertura.

5.1 Trabalhos Futuros

Além da aplicabilidade dos resultados deste trabalho de forma prática, os próprios procedimentos do desenvolvimento do mesmo podem servir como ponto de partida para diversos caminhos de exploração em possíveis trabalhos futuros que venham a abordar temas semelhantes. Existem alternativas tanto no viés técnico e prático de construção e aprimoramento de ferramentas, quanto no viés científico de análise crítica, comprovações e estudos mais aprofundados.

Primeiramente, considerando o aspecto de utilidade real da visualização de mapas de conectividade, pode-se abordar a construção de um sistema interativo que oferece uma interface para geração e manipulação dos mapas, considerando a acessibilidade e possível implantação no uso diário em empresas de rastreamento, por exemplo. Outra possibilidade seria a implementação de integração em “tempo-real” das informações, uma integração mais direta com a base de dados que mantém os registros de rastreamento, atualizando automaticamente os mapas conforme os dispositivos enviam sua localização. Também seria possível integrar os dados de conectividade ao sistema de alerta que avisa quando um veículo perdeu sua conexão, pois tendo conhecimento das regiões sem cobertura, pode-se prever essa situação e evitar alarmes de falsos positivos.

Já no âmbito científico e acadêmico, pode-se desenvolver um estudo da complexidade do algoritmo de inserção de trajetórias, elaborando melhorias e otimizações para melhor eficiência da implementação, por exemplo. Um fator importante que poderia ser examinado em maior profundidade é a corretude dos resultados gerados, empregando métodos precisos e numéricos para cálculo de erros e avaliação da representatividade dos mapas, ao invés das inferências visuais simples utilizadas neste trabalho. Outra opção seria explorar com mais profundidade as categorias de algoritmos não utilizados neste trabalho, derivar métricas de avaliação e eventualmente realizar comparações para determinar melhores alternativas ou validar a preferência por algum método específico.

Por fim, uma terceira possível ramificação seria abordar o problema com maior foco na parte da consolidação da informação de conectividade, ao contrário deste trabalho que foi mais voltado para a reconstrução do mapa em si. Aqui a combinação de pontos foi realizada utilizando interpolação linear, mas existem outras alternativas e métodos de manipulação desses dados durante a construção do mapa que podem eventualmente levar a resultados mais precisos e representativos dos dados originais.

REFERÊNCIAS

- AHMED, M. et al. A comparison and evaluation of map construction algorithms using vehicle tracking data. **Geoinformatica**, v. 19, p. 601–632, 2015.
- AHMED, M. et al. **Map Construction Algorithms**. [S.l.]: Springer Cham, 2015. ISBN 978-3-319-25166-0.
- AHMED, M.; WENK, C. Constructing street networks from gps trajectories. In: EPSTEIN, L.; FERRAGINA, P. (Ed.). **Algorithms - ESA 2012**. Ljubljana, Slovenia: Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. (Lecture Notes in Computer Science, v. 7501), p. 60–71.
- BUCHIN, K.; BUCHIN, M.; WANG, Y. Exact algorithms for partial curve matching via the fréchet distance. In: _____. **Proceedings of the 2009 Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA)**. [s.n.], 2009. p. 645–654. Disponível em: <<https://epubs.siam.org/doi/abs/10.1137/1.9781611973068.71>>.
- DAER RS. **Mapa Rodoviário Interativo do Rio Grande do Sul**. 2019. Disponível em: <<https://mapa.daer.rs.gov.br/i3geo/interface/ol.htm>>.
- DAVIES, J.; BERESFORD, A.; HOPPER, A. Scalable, distributed, real-time map generation. **IEEE Pervasive Computing**, v. 5, n. 4, p. 47–54, 2006.
- EDELKAMP, S.; SCHRÖDL, S. Route planning and map inference with global positioning traces. In: _____. **Computer Science in Perspective: Essays Dedicated to Thomas Ottmann**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003. p. 128–151. ISBN 978-3-540-36477-1. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/3-540-36477-3_10>.
- FATHI, A.; KRUMM, J. Detecting road intersections from gps traces. In: FABRIKANT, S. I. et al. (Ed.). **Geographic Information Science**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 56–69. ISBN 978-3-642-15300-6.
- OpenStreetMap Foundation. **OpenStreetMap**. 2023. Disponível em: <<https://www.openstreetmap.org/copyright>>.
- PFOSER, D.; WENK, C. **Map Construction Algorithms**. 2015. Disponível em: <<http://mapconstruction.org/>>.
- RÖPKE, L. L. Metodologia automatizada para descrever a cobertura de sinal móvel em rodovias: estudo de caso considerando incerteza de dados. **Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação**, 2023. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/28868>>.
- TANG, J. et al. A novel method for road intersection construction from vehicle trajectory data. **IEEE Access**, v. 7, p. 95065–95074, 2019.