

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

**GERAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS
VETORIAIS EM TERRENOS USANDO GIS**

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Maiandro Somavilla Dalcin

Santa Maria, RS, Brasil

2016

GERAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS VETORIAIS EM TERRENOS USANDO GIS

Maiandro Somavilla Dalcin

Trabalho de Graduação apresentado ao Curso de Ciência da Computação da
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para
a obtenção do grau de

Bacharel em Ciência da Computação

Orientador: Prof. Dr. Cesar Tadeu Pozzer

**Trabalho N°: 416
Santa Maria, RS, Brasil**

2016

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Curso de Ciência da Computação**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova o Trabalho de Graduação

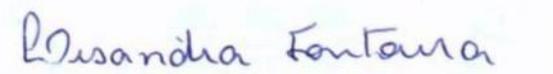
**GERAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS VETORIAIS EM TERRENOS
USANDO GIS**

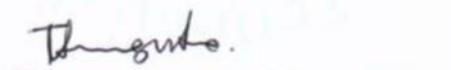
elaborado por
Maiandro Somavilla Dalcin

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

COMISSÃO EXAMINADORA:


Cesar Tadeu Pozzer, Dr.
(Presidente/Orientador)


Lisandra Manzoni Fontoura, Dr^a. (UFSM)


Tiago Augusto Engel, Bel. (UFSM)

Santa Maria, 12 de Dezembro de 2016.

RESUMO

Trabalho de Graduação
Curso de Ciência da Computação
Universidade Federal de Santa Maria

GERAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS VETORIAIS EM TERRENOS USANDO GIS

AUTOR: MAIANDRO SOMAVILLA DALCIN

ORIENTADOR: CESAR TADEU POZZER

Local da Defesa e Data: Santa Maria, 12 de Dezembro de 2016.

Este trabalho apresenta uma solução para a geração de uma malha poligonal focada na construção das junções entre rios/estradas, que é utilizada no processo de renderização da característica sobre o terreno. A abordagem utilizada toma como entrada um arquivo vetorial de linhas que representa a estrutura do rio/estrada e a partir disso realiza uma série de etapas de pré-processamento com o intuito de preparar os dados do arquivo vetorial para a etapa de construção da malha. A solução desenvolvida permite que sejam construídas as junções entre qualquer número de ligações. O objetivo desta abordagem é criar e exportar a malha vetorial assim como o grafo de navegação em um formato comum e de fácil acesso para aplicações que necessitam usá-los, sem a necessidade de reconstrução da malha.

Palavras-chave: Terreno. Rio. Estrada. GIS. Dados vetoriais. Malha poligonal. Junções.

ABSTRACT

Undergraduate Final Work
Undergraduate Program in Computer Science
Federal University of Santa Maria

GENERATION OF VECTOR CHARACTERISTICS ON TERRAINS USING GIS

AUTHOR: MAIANDRO SOMAVILLA DALCIN

ADVISOR: CESAR TADEU POZZER

Defense Place and Date: Santa Maria, December 12st, 2016.

This work presents a solution for the generation of a polygonal mesh focused on the construction of the junctions between rivers/roads, which is used in the process of rendering the feature over the terrain. The approach use as input a vector file of lines representing the river/road structure and after that execute a series of pre-processing steps in order to prepare the vector file data for the mesh construction stage. The developed solution allows the construction of junctions between any number of connections. The purpose of this approach is to create and export the vector mesh as well as the navigation graph in a common and easy-to-access format for applications that need to use them, without a need for mesh reconstruction.

Keywords: Terrain. River. Road. GIS. Vector data. Polygonal mesh. Junctions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Exemplo de sobreposição e buracos na malha.	10
Figura 2.1 – Ilustração de um GIS onde cada camada representa uma característica sendo combinada. (CAMPBELL; SHIN, 2011)	12
Figura 2.2 – Um exemplo de representação de um arquivo vetorial onde os rios são formados por linhas, os lagos por um polígono e os poços por pontos. Adaptada de (WIKIPEDIA, 2016a).....	13
Figura 2.3 – Visualização de um conjunto de entidades onde cada uma delas é representada por uma cor.....	14
Figura 2.4 – Exemplo de uma representação vetorial (esquerda) e sua correspondente versão raster (centro e direita). (GODARD, 2015)	14
Figura 2.5 – Exemplo de uma mapa de elevação do tipo raster em três diferentes resoluções. Adaptado de (KAREN SCHUCKMAN, 2014)	15
Figura 2.6 – Figura extraída de (MCCRAE; SINGH, 2009) que mostra o resultado obtido na criação das junções entre estradas.	16
Figura 2.7 – Figura extraída de (BRUNETON; NEYRET, 2008) que mostra o resultado obtido na construção das características geográficas sobre o terreno.	16
Figura 3.1 – Ilustração de uma configuração que pode ser identificada de diferentes maneiras. A) Duas junções, J1 formada pelas entidades 1, 2 e 3 e J2 formada pelas entidade 3 e 4. B) Uma única junção J formada pelas entidades 1, 2, 3 e 4. C) Uma única junção J formada pelas entidades 1, 2 e pela união das entidades 3 e 4.	18
Figura 3.2 – Figura que mostra a representação vetorial errônea de uma junção juntamente com a imagem de satélite da mesma junção.....	19
Figura 3.3 – Figura que mostra os erros encontrados pela ferramenta desenvolvida sendo exibidos na interface através de pontos azuis.	20
Figura 4.1 – Diagrama de atividades do processo de geração da malha para rios/estradas..	21
Figura 5.1 – Figura que mostra uma célula central (em azul) e suas oito células vizinhas (em vermelho). Adaptada de (WIKIPEDIA, 2016b).....	24
Figura 5.2 – a) Mostra uma situação onde duas entidades (1 e 2) estão ligadas em dois pontos intermediários de outra entidade (3). b) Ilustra a nova organização das entidades após a quebra.	25
Figura 5.3 – Entidade mostrada em azul não está precisamente ligada com outra entidade muito próxima, em vermelho.....	26
Figura 5.4 – Um exemplo de situação que é vista como uma junção tripla mas que é identificada por uma junção entre quatro entidades. Além disso, ilustra a situação onde um pequeno segmento se encontra nas junções.	28
Figura 5.5 – Ilustração de como as entidades da Figura 5.4 ficam após a remoção da entidade que representa o pequeno segmento na junção.	29
Figura 5.6 – Exemplo de situação onde uma aresta, mostrada em vermelho, intersecta várias outras arestas das entidades da junção.	30
Figura 5.7 – Figura que ilustra um conjunto de entidades em uma junção e suas margens direitas e esquerdas juntamente com os pontos de intersecção escolhidos. ...	31
Figura 5.8 – a) Mostra a margem esquerda da entidade três (E3) sendo comparada com todas as margens direita das demais entidades. b) Mostra o mesmo caso de a) partindo da margem direita da entidade um (D1).....	32

Figura 5.9 – Ilustração de uma intersecção entre duas arestas paralelas compostas pelos pontos iniciais (pi) e finais (pf).	32
Figura 5.10 – Ilustração da malha em uma junção após a etapa de ajuste dos vértices.	33
Figura 5.11 – Ilustração da abordagem utilizada para a triângulação do polígono convexo formado pelos pontos de intersecção na junção para três, quatro e demais números de elementos.	34
Figura 6.1 – Resultados obtidos a partir da solução proposta.	35
Figura 6.2 – Ilustração de uma junção e os pontos de intersecção que seriam encontrados utilizando largura fixa e largura arbitrária por entidade.	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1 – Análise de desempenho da construção do grafo com e sem o spatial hashing.	37
Tabela 6.2 – Análise de desempenho individual das principais etapas da solução proposta.	37
Tabela 6.3 – Número de situações encontradas em cada etapa de pré-processamento.	37

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivos	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 GIS	12
2.1.1 Dados vetoriais	13
2.1.2 Raster.....	14
2.1.3 Mapa de elevação.....	15
2.2 Geração de rios e estradas	15
3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	17
4 ORGANIZAÇÃO DA SOLUÇÃO	21
5 IMPLEMENTAÇÃO	23
5.1 Estrutura de dados	23
5.1.1 Spatial Hashing	23
5.2 Pré-processamento dos dados	24
5.2.1 Entidade liga no meio de outra entidade	24
5.2.2 Entidade não liga com outra entidade próxima	26
5.2.3 Segmentos pequenos em junções	28
5.3 Criação das junções	29
5.3.1 Criação das arestas	30
5.3.2 Identificação dos pontos de intersecção	31
5.3.3 Ajuste dos vértices	32
5.3.4 Triangulação	33
6 RESULTADOS	35
6.1 Análise de desempenho	36
7 CONCLUSÃO	39
7.1 Trabalhos futuros	39
REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

Com o crescente aumento no desenvolvimento de aplicações que utilizam Sistemas de Informação Geográficas (GIS), impulsionado pela grande área de aplicação, uma forte iniciativa foi dada para que este tipo de dado fosse disponibilizado gratuitamente para a população. As aplicações de GIS incluem desde a modelagem e visualização de fenômenos ligados a ciências sociais, clima, biologia, etc, até o auxílio na tomada de decisão e planejamento em sistemas de simulação. Segundo CAMPBELL; SHIN (2011), como uma ferramenta, GISs proporcionam uma rica fonte de dados e informações que servem desde o mapeamento do caminho de um furacão até outras tarefas mais complexas como escolher a melhor rota para a coleta do lixo em uma cidade.

Com isso, iniciou-se o desenvolvimento de aplicações tridimensionais que utilizam este tipo de dado para a geração automatizada de cenários virtuais. Em sistemas de simulação, componentes naturais como rios e estradas são requisitos mínimos que proporcionam um nível de realismo básico para um ambiente virtual 3D. Estes componentes, além de servirem como algo visual, podem ser utilizados para simulação e tomada de decisão, por exemplo, em um sistema de simulação de tráfego rodoviário. Contudo, a automatização do processo de geração destas características em um ambiente tridimensional através de dados de GIS possui diversas barreiras pois é necessário que uma grande quantidade de dados seja processada para garantir que os mesmos estejam dispostos da melhor maneira possível para o desenvolvimento.

Para a construção de ambientes tridimensionais é necessário que se tenha uma descrição das geometrias dos rios/estradas. Esta geometria é constituída por uma malha poligonal formada por um conjunto de triângulos, gerada a partir das descrições vetoriais, com o objetivo de descrever com precisão local os atributos que deverão ser usados para a renderização dos rios/estradas.

Como os arquivos vetoriais são sujeitos a erros, é necessário que os mesmos sejam corrigidos de forma semi-automática para que o grafo gerado esteja correto para a etapa de construção da malha poligonal. Diversos aspectos devem ser levados em consideração neste processo de forma a evitar que a junção de vários rios/estradas possua sobreposições e buracos entre triângulos conforme mostra a Figura 1.1. A sobreposição de triângulos pode gerar problemas na renderização da malha dependendo da abordagem utilizada.

Sendo assim, este trabalho propõe uma solução para a geração de uma malha poligonal

focada na construção das junções entre rios/estradas, sem sobreposição ou buracos, usando dados geográficos reais. As soluções são focadas para sistemas de simulação mas podem ser usadas por qualquer outra aplicação 3D como jogos e outros sistemas virtuais.

A solução será implementada em uma ferramenta que tem como objetivo o carregamento, verificação de erros, construção e exportação da malha, dos dados vetoriais e do grafo de navegação em um formato que seja simples de ser importado por outras aplicações.

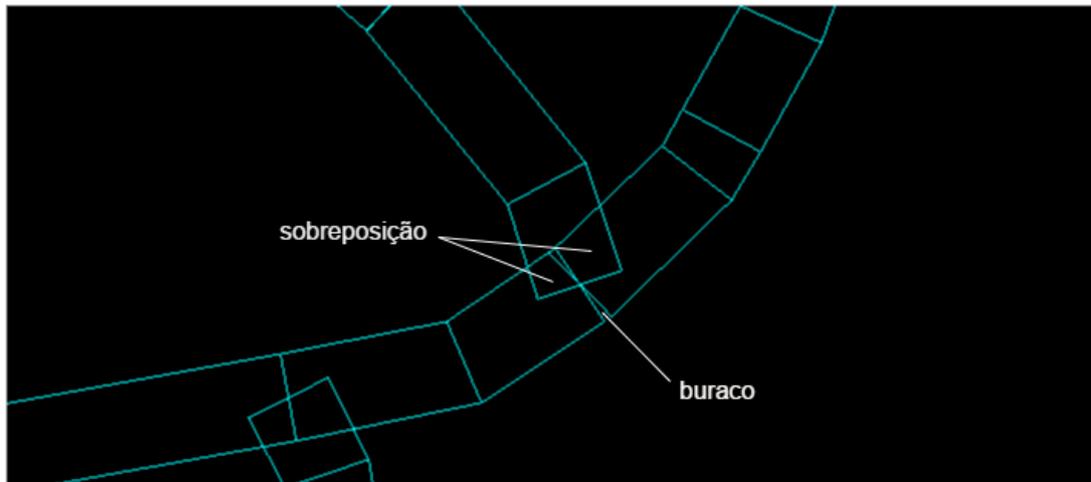


Figura 1.1 – Exemplo de sobreposição e buracos na malha.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo a geração de uma malha poligonal para rios/estradas a partir de dados vetoriais, focado na construção das junções sem sobreposição ou buracos. Esta solução não como objetivo principal, porém é desejável, o desempenho pois a malha será gerada em uma etapa de pré-processamento e exportada para que, posteriormente, possa ser usada por qualquer aplicação sem a necessidade de gerá-la novamente.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Garantir que a solução seja eficiente o suficiente para o pré-processamento dos dados.
- Fazer com que o algoritmo de geração da malha seja eficaz no sentido de criar corretamente as junções após as etapas de pré-processamento dos dados vetoriais.
- Gerar uma malha poligonal que possa ser facilmente utilizada em ferramentas de geração de ambientes virtuais, etc.
- Exportar as informações vetoriais em um formato simples e de rápida importação.

- Garantir a corretude do grafo de navegação sobre a malha gerada para o uso de algoritmos de busca por caminhos.

O trabalho está organizado da seguinte maneira: Capítulo 2 define alguns conceitos básicos para o entendimento do trabalho, Capítulo 3 descreve os trabalhos relacionados encontrados na literatura sobre a geração de rios/estradas, Capítulo 4 mostra os problemas encontrados durante o desenvolvimento da solução, Capítulo 5 demonstra a estrutura e a organização da solução encontrada e o Capítulo 6 a implementação da solução. Finalmente, são mostrados os resultados obtidos e os trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tendo como principal objetivo deste trabalho a criação de uma malha poligonal focada na construção das junções entre vários rios/estradas, este capítulo visa revisar trabalhos similares e as estratégias adotadas pelos mesmos para a geração de rios e estradas como também apresentar alguns conceitos que irão ajudar no entendimento do trabalho.

2.1 GIS

Uma maneira popular de descrever e visualizar um GIS é imaginando um bolo com várias camadas. Cada camada do bolo representa uma característica geográfica (rios, lagos, construções, estradas, elevação, etc) que combinadas representam uma área (CAMPBELL; SHIN, 2011), como pode ser observado pela Figura 2.1. Cada camada é representada por diferentes arquivos e deve casar precisamente com a outra, por exemplo, não deve existir uma casa em cima de uma estrada. Existem três principais tipo de dados de GIS: dados vetoriais, dados raster e dados de elevação.

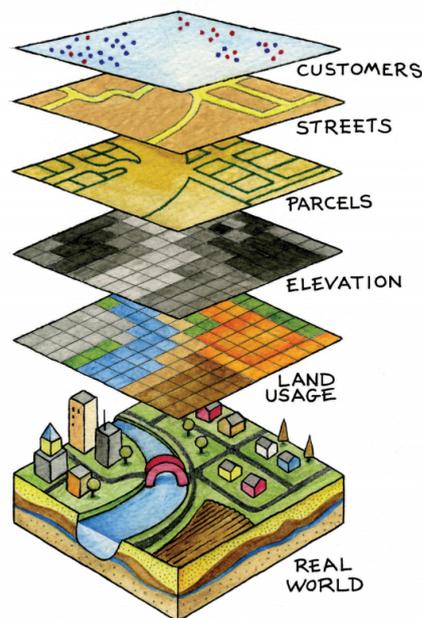


Figura 2.1 – Ilustração de um GIS onde cada camada representa uma característica sendo combinada. (CAMPBELL; SHIN, 2011)

2.1.1 Dados vetoriais

Os dados vetoriais são armazenados em um arquivo como um conjunto de vértices bidimensionais ou tridimensionais que representam os nós de um modelo arco-nó, e as linhas, formadas por dois nós, representam os arcos. Os dados podem representar, basicamente, pontos, linhas e polígonos que, por exemplo, podem ser vistos como a localização de uma estação, estradas e áreas florestais, respectivamente. Cada dado armazenado pode possuir um conjunto de outras informações relacionadas que servem para descrevê-lo mais detalhadamente como por exemplo, a capacidade e o tipo da estação, a largura e a velocidade máxima da estrada e os tipos de árvores presentes na área florestal. A Figura 2.2 mostra um exemplo de representação.

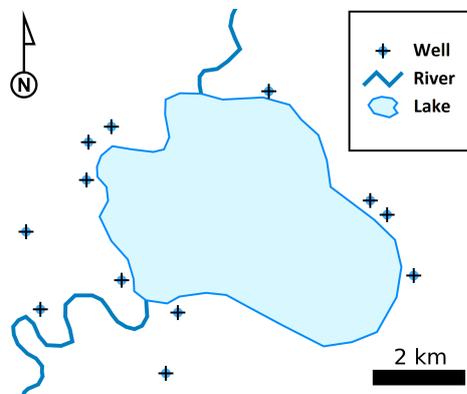


Figura 2.2 – Um exemplo de representação de um arquivo vetorial onde os rios são formados por linhas, os lagos por um polígono e os poços por pontos. Adaptada de (WIKIPEDIA, 2016a)

Durante o decorrer deste trabalho, será usado o termo entidade para representar um conjunto de pontos que tem relação ou que representam um trecho do rio/estrada. Este termo é mais comumente conhecido por *polyline*. A Figura 2.3 mostra um conjunto de entidades, cada uma delas representada por uma cor, extraídas do arquivo vetorial.

2.1.3 Mapa de elevação

Os mapas de elevação, mais conhecidos por DEM (Modelo Digital de Elevação), são imagens georreferenciadas que representam a elevação de uma certa área. Os DEMs podem ser representados tanto como um raster ou como uma Rede Irregular Triangular (TIN).

Em uma representação do tipo TIN, os dados armazenados são um conjunto de pontos tridimensionais. Como a representação é feita através de uma rede irregular, os triângulos contidos na estrutura podem possuir tamanhos diferentes. Sendo assim, regiões planas podem ser representadas por triângulos maiores enquanto regiões mais irregulares são representadas por triângulos menores.

A Figura 2.5 mostra um exemplo de um mapa de elevação do tipo raster criado em três diferentes resoluções: 30 metros, 10 metros e 3 metros.

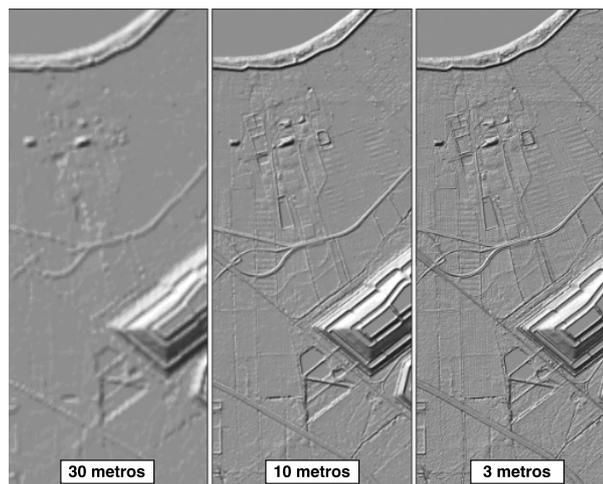


Figura 2.5 – Exemplo de uma mapa de elevação do tipo raster em três diferentes resoluções. Adaptado de (KAREN SCHUCKMAN, 2014)

2.2 Geração de rios e estradas

Berkhahn (BERKHAHN et al., 2005), focado na geração de rios, toma como ponto de partida o mapa de elevação ao invés dos dados vetoriais. A partir disso, identifica as possíveis localizações da rede fluvial e a constrói. O problema desta abordagem, para uma precisa identificação dos rios, é a necessidade de um mapa de elevação com alta resolução. Berkhahn utiliza um mapa de elevação com 5 metros de resolução, o que é relativamente difícil de se obter.

Trabalhos como (BRUNETON; NEYRET, 2008) e (MCCRAE; SINGH, 2009) realizam a construção das junções entre vários rios/estradas. As Figuras 2.6 e 2.7 mostram os resultados

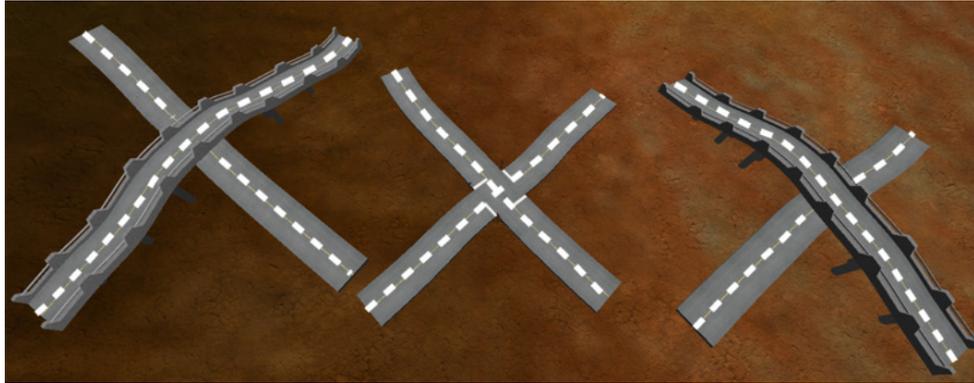


Figura 2.6 – Figura extraída de (MCCRAE; SINGH, 2009) que mostra o resultado obtido na criação das junções entre estradas.



Figura 2.7 – Figura extraída de (BRUNETON; NEYRET, 2008) que mostra o resultado obtido na construção das características geográficas sobre o terreno.

da construção de uma junção obtido por McCrae e Bruneton, respectivamente. Bruneton diz que as junções são geradas proceduralmente baseadas em uma descrição enquanto McCrae não explica exatamente como a malha das junções é gerada. Além disso, os trabalhos que usam dados vetoriais como ponto de partida podem ter utilizado os dados sem se preocupar com os problemas que podem ser encontrados em dados reais como os apontados no Capítulo 3.

Além disso, existem ferramentas comerciais automatizadas de relativamente alto custo focadas em sistemas de simulação para a geração de cenários virtuais a partir de dados geográficos como (TERRAVISTA TERRAIN GENERATION, 2016). Também, existem ferramentas como (OUTERRA, 2016) que permite uma visualização realística de uma réplica da Terra totalmente construída a partir de dados geográficos.

3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Este capítulo trata sobre os principais problemas encontrados no desenvolvimento da solução. Vale ressaltar que são muitas as situações possíveis que podem se tornar complexas, encontradas nos arquivos vetoriais. Isso faz com que a criação de uma solução autônoma e eficiente em qualquer situação seja praticamente inviável. Sendo assim, a solução desenvolvida visa tratar os principais casos encontrados durante a etapa de desenvolvimento.

Para a correta criação da malha poligonal para os rios/estradas, sem sobreposição e buracos, tendo como entrada um arquivo vetorial, é necessário que o mesmo passe por uma série de ajustes para que a informação esteja de acordo para o processo de construção da malha. A construção da malha sem sobreposição e buracos é necessária para que problemas como o de *z-buffer* não aconteçam dependendo do tipo de abordagem utilizada na etapa de renderização.

A Figura 3.1 mostra um exemplo de uma situação que pode ser identificada de diversas maneiras podendo causar inconsistências e a criação errada da junção. A figura mostra uma configuração com quatro segmentos (1, 2, 3 e 4) assim como as correspondentes margens esquerdas e direitas de cada segmento. Esta configuração pode ser identificada de duas maneiras: uma única junção ou duas junções diferentes.

Para a primeira delas, duas são as interpretações possíveis: uma junção formada pelas entidades 1, 2, 3 e 4 (Figura 3.1.b) ou uma junção formada por três (3 e 4 pertencem a uma única entidade. Figura 3.1.c). Para que seja uma única junção entre quatro entidades a distância d deve ser menor que a distância máxima usada para a identificação das mesmas. Neste caso, a junção é identificada como uma junção entre quatro entidades mas que visualmente deveria ser tratada como uma junção tripla. Em ambas interpretações esta situação pode causar inconsistências na etapa de construção das arestas, que será abordada na Seção 5.3.1 do Capítulo 5, fazendo com que seja passado informações erradas para as próximas etapas do processo.

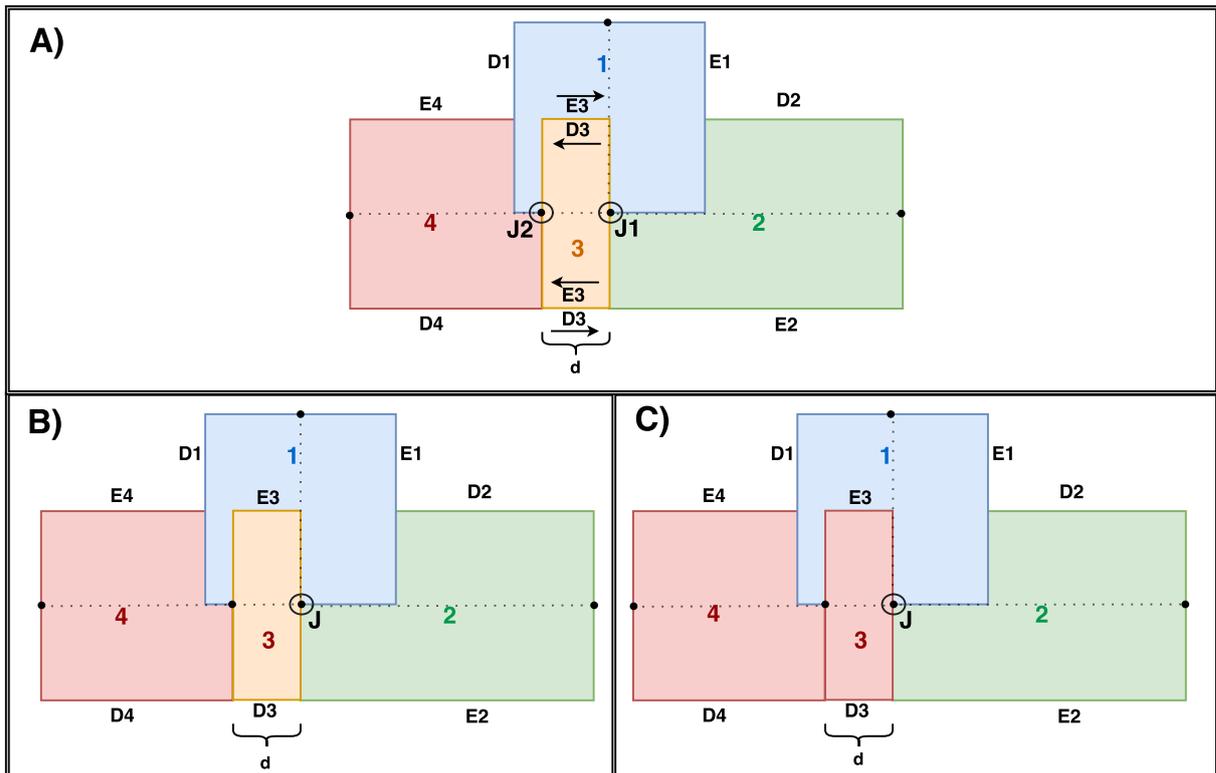


Figura 3.1 – Ilustração de uma configuração que pode ser identificada de diferentes maneiras. A) Duas junções, J1 formada pelas entidades 1, 2 e 3 e J2 formada pelas entidades 3 e 4. B) Uma única junção J formada pelas entidades 1, 2, 3 e 4. C) Uma única junção J formada pelas entidades 1, 2 e pela união das entidades 3 e 4.

Caso esta situação seja identificada como duas junções (Figura 3.1.a), J1 formada pelas entidades 1, 2 e 3 e J2 formada pelas entidades 3 e 4, a distância d , entre as junções J1 e J2, deve ser maior que a distância máxima utilizada para a identificação do ponto de junção entre as entidades. Pela Figura 3.1.a pode-se observar que para esta situação, uma intersecção entre as arestas D1 e E4 acontece, porém as entidades que elas pertencem não fazem parte da mesma junção. A solução para esta situação é complexa de se tratar, pois é necessário que caso não haja nenhuma intersecção entre as arestas das entidades que fazem parte de uma junção, a busca pela intersecção seja expandida para todas as entidades vizinhas das entidades da junção.

O problema disso é que, partindo da entidade 1 da Figura 3.1.a, a margem direita (D1) não vai intersecar nenhuma das margens das entidades da junção (2 e 3), sendo assim, a busca seria expandida para as entidades vizinhas das entidades da junção e assim seria identificado a intersecção entre D1 e E4. Caso seja partido da entidade 4, a intersecção encontrada será entre E4 e D3, pois a intersecção existe e é entre as entidades da junção, a busca não é expandida para as entidades vizinhas, que é diferente da intersecção encontrada partindo da entidade 1. Sendo assim, o processo de identificação dos pontos de intersecção que será abordado na Seção

5.3.2 do Capítulo 5, encontrará duas intersecções diferentes causando uma falha no processo de criação.

Além disso, a fim de garantir a corretude do grafo de navegação usado por algoritmos de busca por caminhos para a navegação sobre a malha gerada uma série de verificações devem ser realizadas antes da etapa de criação da malha. Uma das verificações é a identificação se duas entidades próximas estão conectadas, tópico abordado em mais detalhes na Seção 5.2.2. A Figura 3.2 mostra uma representação vetorial de junção identificada como problemática juntamente com uma imagem de satélite representando a mesma junção. A maior dificuldade desta verificação é a capacidade de discernir se a ligação entre duas entidades realmente existe ou não de forma autônoma a partir dos dados vetoriais.



Figura 3.2 – Figura que mostra a representação vetorial errônea de uma junção juntamente com a imagem de satélite da mesma junção.

Sendo assim, de forma a garantir que o grafo de navegação esteja correto, esta situação não é corrigida automaticamente durante o processo de pré-processamentos dos dados vetoriais e é necessário intervenção humana. A ferramenta desenvolvida para a identificação desta situação aponta os erros via texto e interface gráfica, como mostra a Figura 3.3, que somente uma pessoa pode corrigir, com precisão, verificando imagens reais.

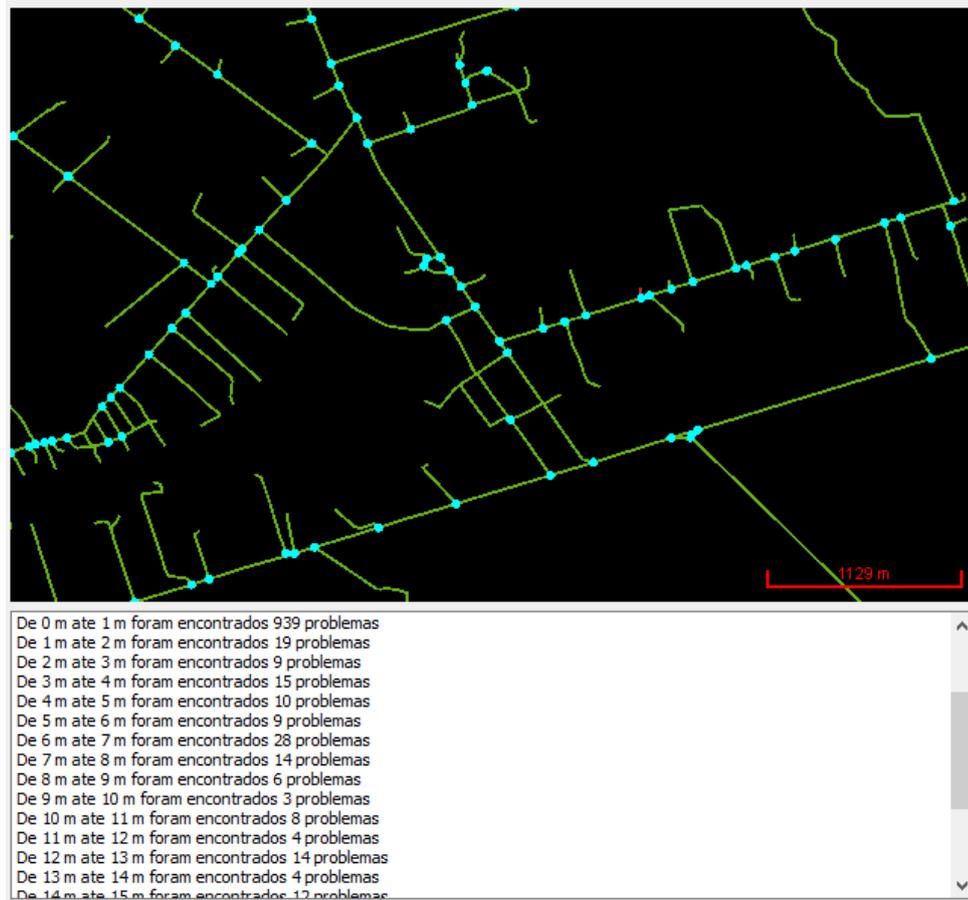
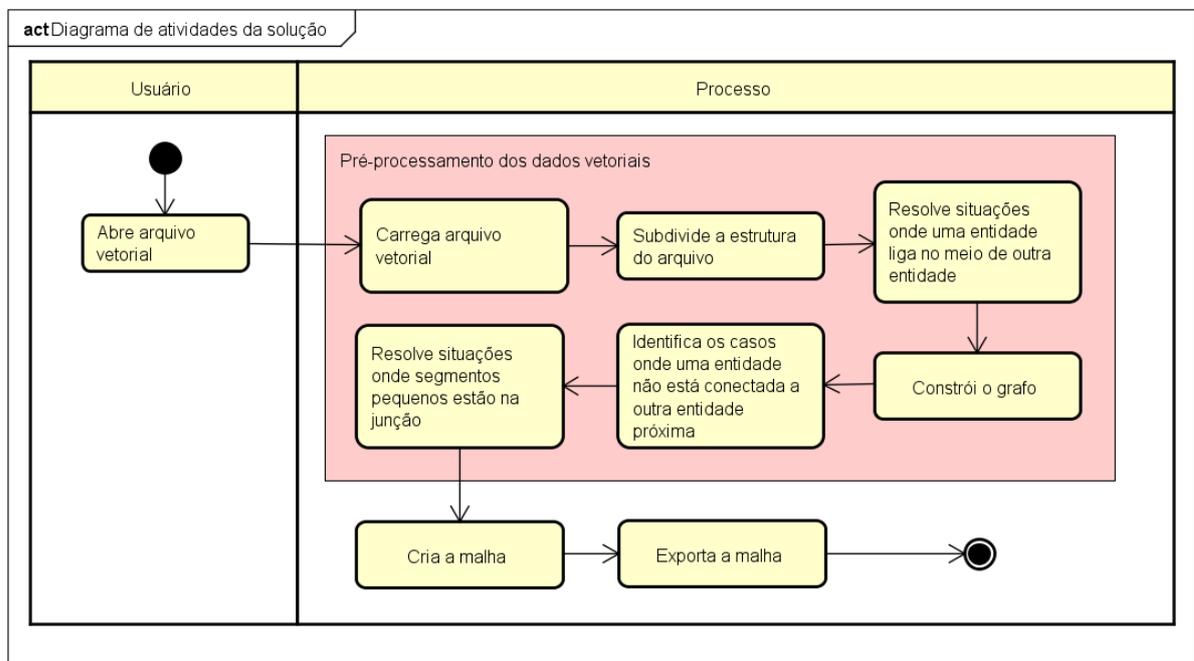


Figura 3.3 – Figura que mostra os erros encontrados pela ferramenta desenvolvida sendo exibidos na interface através de pontos azuis.

4 ORGANIZAÇÃO DA SOLUÇÃO

Neste capítulo é tratado sobre a estrutura e a organização da solução para a geração da malha para rios/estradas desde o carregamento dos dados até a exportação. A solução foi desenvolvida em uma ferramenta que tem por objetivo principal a simplificação do processo de importação de dados geográficos.

Como nenhum dos trabalhos encontrados na literatura explicam como o problema proposto é resolvido, este trabalho propõe uma solução que foi desenvolvida como um processo composto por diversas etapas, como é ilustrado pela diagrama de atividades da Figura 4.1:



powered by Astah

Figura 4.1 – Diagrama de atividades do processo de geração da malha para rios/estradas.

A ferramenta foi desenvolvida utilizando a linguagem de programação C++ e a plataforma de desenvolvimento Qt devido a facilidade que interfaces gráficas são criadas. A plataforma possui uma diversa quantidade de componentes gráficos que podem ser facilmente adicionados a partir de uma interface gráfica.

Os dados vetoriais utilizados estão em um formato *ESRI Shapefile* (ESRI, 1998), que é um dos formatos mais comumente utilizados para armazenamento de dados vetoriais. Para o carregamento dos dados vetoriais, foi utilizado a biblioteca GDAL (GDAL, 2016), que é implementada em C e possui uma abstração para C++. A biblioteca permite que os dados

geográficos sejam extraídos de maneira simples e com instruções de alto nível.

A partir disso a estrutura que tem por objetivo acelerar o processo de identificação de proximidade entre pontos e a criação do grafo, que é mostrada na Seção 5.1 do Capítulo 5, é construída. Após, inicia-se as etapas que visam preparar os dados vetoriais para a etapa de criação da malha poligonal, que são mostradas na Seção 5.2. Finalmente, a malha será criada utilizando a abordagem que é discutida com mais detalhes na Seção 5.3.

Após a criação da malha, a ferramenta é responsável por exportar a malha e os dados geográficos em um formato simples de ser carregado por outras aplicações sem a necessidade de bibliotecas específicas e totalmente transparente do formato geográfico. Os dados vetoriais, juntamente com o grafo de navegação, são exportados utilizando o formato JSON enquanto a malha criada é exportada no formato *Wavefront OBJ*.

JSON (*JavaScript Object Notation*) (THE JSON DATA INTERCHANGE FORMAT, 2013) é um formato de texto aberto, baseado na linguagem de programação JavaScript, para transferência de dados de simples entendimento por humanos e de rápido processamento. O formato basicamente permite o armazenamento de informações através de um conjunto de nomes/valores que permitem a representação de objetos, estruturas, entre outras coisas e um conjunto de valores ordenados que representam uma lista.

Nurseitov (NURSEITOV et al., 2009) faz uma comparação entre JSON e o seu principal concorrente, o XML. Os resultados apontam que o JSON é mais rápido e usa menos recursos que o XML.

O formato objeto (OBJECT FILES, 2016), também conhecido por *Wavefront OBJ*, é um formato simples e aberto adotado por várias ferramentas comerciais de manipulação de objetos tridimensionais que permite o armazenamento de geometrias tridimensionais. O armazenamento das informações é feito através de uma tag e uma sequência de valores. O formato permite o armazenamento de uma série de informações relacionadas a cada vértice da geometria como coordenadas de textura, normais, entre outras coisas.

5 IMPLEMENTAÇÃO

5.1 Estrutura de dados

A estrutura escolhida para representar o arquivo vetorial é um grafo. Esta estrutura permite que sejam representadas as relações entre as entidades que são as ligações entre elas, ou seja, cada nó do grafo é representado por uma entidade. Para a construção do grafo é iterado sobre o conjunto de todos os vértices do arquivo, verificando se um dos vértices intersecta algum dos demais, deve-se adicionar uma ligação entre as entidades que os vértices pertencem. Esta abordagem pode ser bastante custosa, principalmente para arquivos com muitos vértices, pois possui complexidade $\mathcal{O}(n^2)$. Sendo assim, foi implementada uma técnica de subdivisão do espaço conhecida por *Spatial Hashing* com o objetivo de acelerar o processo de criação do grafo a partir do arquivo vetorial.

5.1.1 Spatial Hashing

Spatial Hashing é uma técnica onde objetos no espaço bidimensional ou tridimensional são projetados em uma tabela hash unidimensional possibilitando rápidas buscas no espaço do objeto (HASTINGS; MESIT; GUHA, 2005). Foi implementado a solução proposta por (POZZER; LARA PAHINS; HELDAL, 2014), que permite a construção da tabela hash em complexidade $\mathcal{O}(n)$, baseado em memória linear. A função hash permite que, dado um ponto bidimensional ou tridimensional, seja encontrada, baseado no número de células que o espaço foi subdividido, a célula em que o ponto se encontra em complexidade $\mathcal{O}(1)$.

A partir dessa informação, é possível identificar quais são as células vizinhas da célula encontrada, que são as oito células conectadas em torno da célula encontrada, como é mostrado pela Figura 5.1, fazendo com que o número de comparações em uma operação de identificação de proximidade entre dois pontos, em um espaço com muitos objetos, seja reduzido, dependendo do tamanho de cada célula, pois restringe o número de comparações de um ponto com todos os pontos do espaço para somente os pontos das células vizinhas.

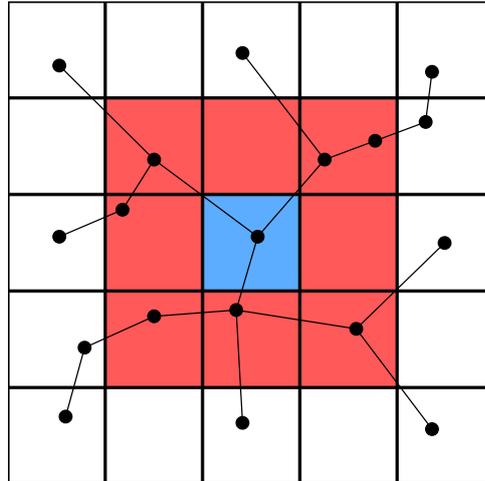


Figura 5.1 – Figura que mostra uma célula central (em azul) e suas oito células vizinhas (em vermelho). Adaptada de (WIKIPEDIA, 2016b)

5.2 Pré-processamento dos dados

Nesta seção, são tratadas as estratégias de pré-processamento implementadas para manipulação dos dados vetoriais com o objetivo de simplificar o processo de construção da malha dos rios/estradas a partir do arquivo vetorial. O principal objetivo da etapa de pré-processamento é verificar os arquivos vetoriais a fim de identificar situações que, na etapa de construção, possam se tornar desnecessariamente complexas e preparar os dados vetoriais para a aplicação das estratégias desenvolvidas. Após diversas correções e alterações a malha dos rios/estradas pode ser criada.

5.2.1 Entidade liga no meio de outra entidade

Esta situação acontece quando uma entidade liga em algum vértice intermediário de outra entidade, ou seja, em algum vértice que não é o inicial ou o final. Na Figura 5.2.a é possível observar que as entidades 1 e 2 se ligam com a entidade 3, mostrada em azul, em dois pontos intermediários distintos. Para identificar esta situação é iterado sobre cada vértice final e inicial das entidades comparando com os demais vértices das entidades das células vizinhas, obtidos a partir do *spatial hashing*. Caso eles estejam ligados, deve-se verificar se a ligação acontece em algum vértice que não é o inicial ou final.

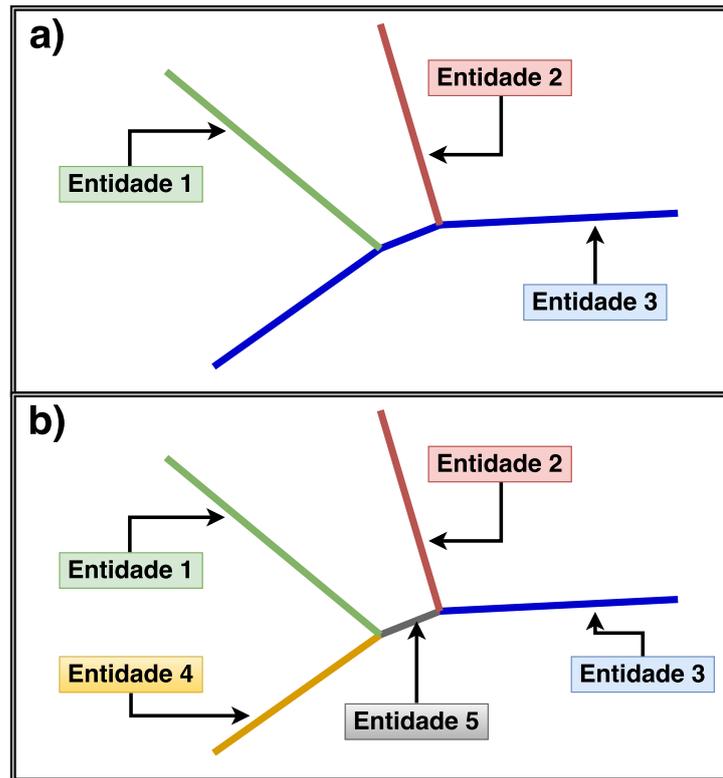


Figura 5.2 – a) Mostra uma situação onde duas entidades (1 e 2) estão ligadas em dois pontos intermediários de outra entidade (3). b) Ilustra a nova organização das entidades após a quebra.

Para solucionar esta situação, o índice do vértice onde a entidade deve ser quebrada e o identificador da entidade são adicionados em uma lista de entidades a serem quebradas. Após a identificação dos índices, cada entidade é submetida ao processo que irá quebrá-la em duas ou mais partes, como mostra a Figura 5.2.b. Ao final, os identificadores de cada entidade devem ser atualizados e o *spatial hashing* deve ser reconstruído a fim de manter a estrutura consistente com as alterações realizadas. As entidades não são quebradas no momento que são identificadas pois isso requer que a estrutura de dados seja atualizada a cada alteração. Deixando o processo de quebra separado do processo de identificação faz com que seja necessário somente uma atualização no final do processo.

A correção de situações como essa faz com que o processo de identificação das junções e a geração do grafo seja muito mais simples e rápida uma vez que as entidades somente poderão se conectar em pontos extremos. Isso faz com que seja reduzido o número de comparações na identificação do ponto de ligação entre duas entidades de todos os pontos de uma entidade com todos os pontos da outra para somente entre os pontos extremos, muito utilizado na identificação das demais situações que devem ser resolvidas e para o processo de geração das junções para rios/estradas que será abordada na Seção 5.3.

5.2.2 Entidade não liga com outra entidade próxima

Nesta situação, uma entidade não está precisamente conectada a uma entidade próxima, como pode ser observado na Figura 5.3. Para identificar se duas entidades estão conectadas é necessário verificar a distância entre um vértice, inicial ou final, de uma entidade e um segmento da outra entidade. Se a distância for relativamente pequena, o vértice está conectado ao segmento.

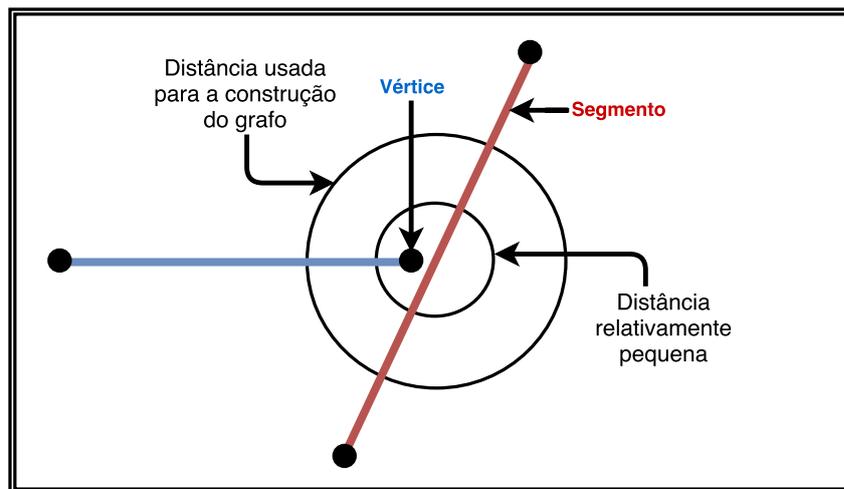


Figura 5.3 – Entidade mostrada em azul não está precisamente ligada com outra entidade muito próxima, em vermelho.

A Figura 5.3 mostra também a situação onde a distância entre um vértice e um segmento é relativamente pequena, porém a intersecção não será identificada na construção do grafo pois nenhum dos vértices do segmento estão dentro da distância usada para a identificação das intersecções. Sendo assim, é necessário que, após verificar que a distância entre o ponto e o segmento é relativamente pequena, seja verificada a distância entre o vértice e os pontos que compõem o segmento. Caso ela seja menor que a distância usada para a identificação das junções, o vértice está devidamente conectado conforme mostra o Algoritmo 1. A maior dificuldade para esta abordagem é definir uma distância genérica a fim de discernir se a ligação existe ou não, visto que ela depende muito da dimensão real da área e do que está sendo analisado. Sendo assim, esta situação não é corrigida automaticamente durante o processo.

Algoritmo 1: IDENTIFICA LIGAÇÕES INCONSISTENTES

```

1 início
2   para cada célulaA ∈ hash faça
3     célulasParaVisitar ← ENCONTRACELULASVIZINHAS(célulaA)
4     para cada célulaB ∈ célulasParaVisitar faça
5       para cada pontoA ∈ célulaA faça
6         entidadeA ← PEGAENTIDADEDOPONTO(pontoA)
7         para cada pontoB ∈ célulaB faça
8           entidadeB ← PEGAENTIDADEDOPONTO(pontoB)
9           se entidadeA == entidadeB então
10            | continue
11            fim
12            se INDICEDEENTRODAENTIDADE(pontoB) >=
13              NUMERODEPONTOS(entidadeB) - 1 então
14                | continue
15                fim
16                segmento ← SEGMENTO(pontoB, pontoB + 1)
17                distancia ← DISTANCIA(pontoA, segmento)
18                se distancia < DistanciaRelativamentePequena então
19                  se DISTANCIA(pontoA, pontoB) >
20                    DistanciaDeInterseccao &
21                    DISTANCIA(pontoA, pontoB + 1) >
22                    DistanciaDeInterseccao então
23                    | possíveisPontosDefeituosos ← pontoA
24                    fim
25                    fim
26                    fim
27                    fim
28                    fim
29                    fim
30                    fim
31                    fim
32                    fim
33                    fim
34                    fim
35                    fim
36                    fim
37                    fim
38                    fim
39                    fim
40                    fim
41                    fim
42                    fim
43                    fim
44                    fim
45                    fim
46                    fim
47                    fim
48                    fim
49                    fim
50                    fim
51                    fim
52                    fim
53                    fim
54                    fim
55                    fim
56                    fim
57                    fim
58                    fim
59                    fim
60                    fim
61                    fim
62                    fim
63                    fim
64                    fim
65                    fim
66                    fim
67                    fim
68                    fim
69                    fim
70                    fim
71                    fim
72                    fim
73                    fim
74                    fim
75                    fim
76                    fim
77                    fim
78                    fim
79                    fim
80                    fim
81                    fim
82                    fim
83                    fim
84                    fim
85                    fim
86                    fim
87                    fim
88                    fim
89                    fim
90                    fim
91                    fim
92                    fim
93                    fim
94                    fim
95                    fim
96                    fim
97                    fim
98                    fim
99                    fim
100                   fim
101                   fim
102                   fim
103                   fim
104                   fim
105                   fim
106                   fim
107                   fim
108                   fim
109                   fim
110                   fim
111                   fim
112                   fim
113                   fim
114                   fim
115                   fim
116                   fim
117                   fim
118                   fim
119                   fim
120                   fim
121                   fim
122                   fim
123                   fim
124                   fim
125                   fim
126                   fim
127                   fim
128                   fim
129                   fim
130                   fim
131                   fim
132                   fim
133                   fim
134                   fim
135                   fim
136                   fim
137                   fim
138                   fim
139                   fim
140                   fim
141                   fim
142                   fim
143                   fim
144                   fim
145                   fim
146                   fim
147                   fim
148                   fim
149                   fim
150                   fim
151                   fim
152                   fim
153                   fim
154                   fim
155                   fim
156                   fim
157                   fim
158                   fim
159                   fim
160                   fim
161                   fim
162                   fim
163                   fim
164                   fim
165                   fim
166                   fim
167                   fim
168                   fim
169                   fim
170                   fim
171                   fim
172                   fim
173                   fim
174                   fim
175                   fim
176                   fim
177                   fim
178                   fim
179                   fim
180                   fim
181                   fim
182                   fim
183                   fim
184                   fim
185                   fim
186                   fim
187                   fim
188                   fim
189                   fim
190                   fim
191                   fim
192                   fim
193                   fim
194                   fim
195                   fim
196                   fim
197                   fim
198                   fim
199                   fim
200                   fim
201                   fim
202                   fim
203                   fim
204                   fim
205                   fim
206                   fim
207                   fim
208                   fim
209                   fim
210                   fim
211                   fim
212                   fim
213                   fim
214                   fim
215                   fim
216                   fim
217                   fim
218                   fim
219                   fim
220                   fim
221                   fim
222                   fim
223                   fim
224                   fim
225                   fim
226                   fim
227                   fim
228                   fim
229                   fim
230                   fim
231                   fim
232                   fim
233                   fim
234                   fim
235                   fim
236                   fim
237                   fim
238                   fim
239                   fim
240                   fim
241                   fim
242                   fim
243                   fim
244                   fim
245                   fim
246                   fim
247                   fim
248                   fim
249                   fim
250                   fim
251                   fim
252                   fim
253                   fim
254                   fim
255                   fim
256                   fim
257                   fim
258                   fim
259                   fim
260                   fim
261                   fim
262                   fim
263                   fim
264                   fim
265                   fim
266                   fim
267                   fim
268                   fim
269                   fim
270                   fim
271                   fim
272                   fim
273                   fim
274                   fim
275                   fim
276                   fim
277                   fim
278                   fim
279                   fim
280                   fim
281                   fim
282                   fim
283                   fim
284                   fim
285                   fim
286                   fim
287                   fim
288                   fim
289                   fim
290                   fim
291                   fim
292                   fim
293                   fim
294                   fim
295                   fim
296                   fim
297                   fim
298                   fim
299                   fim
300                   fim
301                   fim
302                   fim
303                   fim
304                   fim
305                   fim
306                   fim
307                   fim
308                   fim
309                   fim
310                   fim
311                   fim
312                   fim
313                   fim
314                   fim
315                   fim
316                   fim
317                   fim
318                   fim
319                   fim
320                   fim
321                   fim
322                   fim
323                   fim
324                   fim
325                   fim
326                   fim
327                   fim
328                   fim
329                   fim
330                   fim
331                   fim
332                   fim
333                   fim
334                   fim
335                   fim
336                   fim
337                   fim
338                   fim
339                   fim
340                   fim
341                   fim
342                   fim
343                   fim
344                   fim
345                   fim
346                   fim
347                   fim
348                   fim
349                   fim
350                   fim
351                   fim
352                   fim
353                   fim
354                   fim
355                   fim
356                   fim
357                   fim
358                   fim
359                   fim
360                   fim
361                   fim
362                   fim
363                   fim
364                   fim
365                   fim
366                   fim
367                   fim
368                   fim
369                   fim
370                   fim
371                   fim
372                   fim
373                   fim
374                   fim
375                   fim
376                   fim
377                   fim
378                   fim
379                   fim
380                   fim
381                   fim
382                   fim
383                   fim
384                   fim
385                   fim
386                   fim
387                   fim
388                   fim
389                   fim
390                   fim
391                   fim
392                   fim
393                   fim
394                   fim
395                   fim
396                   fim
397                   fim
398                   fim
399                   fim
400                   fim
401                   fim
402                   fim
403                   fim
404                   fim
405                   fim
406                   fim
407                   fim
408                   fim
409                   fim
410                   fim
411                   fim
412                   fim
413                   fim
414                   fim
415                   fim
416                   fim
417                   fim
418                   fim
419                   fim
420                   fim
421                   fim
422                   fim
423                   fim
424                   fim
425                   fim
426                   fim
427                   fim
428                   fim
429                   fim
430                   fim
431                   fim
432                   fim
433                   fim
434                   fim
435                   fim
436                   fim
437                   fim
438                   fim
439                   fim
440                   fim
441                   fim
442                   fim
443                   fim
444                   fim
445                   fim
446                   fim
447                   fim
448                   fim
449                   fim
450                   fim
451                   fim
452                   fim
453                   fim
454                   fim
455                   fim
456                   fim
457                   fim
458                   fim
459                   fim
460                   fim
461                   fim
462                   fim
463                   fim
464                   fim
465                   fim
466                   fim
467                   fim
468                   fim
469                   fim
470                   fim
471                   fim
472                   fim
473                   fim
474                   fim
475                   fim
476                   fim
477                   fim
478                   fim
479                   fim
480                   fim
481                   fim
482                   fim
483                   fim
484                   fim
485                   fim
486                   fim
487                   fim
488                   fim
489                   fim
490                   fim
491                   fim
492                   fim
493                   fim
494                   fim
495                   fim
496                   fim
497                   fim
498                   fim
499                   fim
500                   fim
501                   fim
502                   fim
503                   fim
504                   fim
505                   fim
506                   fim
507                   fim
508                   fim
509                   fim
510                   fim
511                   fim
512                   fim
513                   fim
514                   fim
515                   fim
516                   fim
517                   fim
518                   fim
519                   fim
520                   fim
521                   fim
522                   fim
523                   fim
524                   fim
525                   fim
526                   fim
527                   fim
528                   fim
529                   fim
530                   fim
531                   fim
532                   fim
533                   fim
534                   fim
535                   fim
536                   fim
537                   fim
538                   fim
539                   fim
540                   fim
541                   fim
542                   fim
543                   fim
544                   fim
545                   fim
546                   fim
547                   fim
548                   fim
549                   fim
550                   fim
551                   fim
552                   fim
553                   fim
554                   fim
555                   fim
556                   fim
557                   fim
558                   fim
559                   fim
560                   fim
561                   fim
562                   fim
563                   fim
564                   fim
565                   fim
566                   fim
567                   fim
568                   fim
569                   fim
570                   fim
571                   fim
572                   fim
573                   fim
574                   fim
575                   fim
576                   fim
577                   fim
578                   fim
579                   fim
580                   fim
581                   fim
582                   fim
583                   fim
584                   fim
585                   fim
586                   fim
587                   fim
588                   fim
589                   fim
590                   fim
591                   fim
592                   fim
593                   fim
594                   fim
595                   fim
596                   fim
597                   fim
598                   fim
599                   fim
600                   fim
601                   fim
602                   fim
603                   fim
604                   fim
605                   fim
606                   fim
607                   fim
608                   fim
609                   fim
610                   fim
611                   fim
612                   fim
613                   fim
614                   fim
615                   fim
616                   fim
617                   fim
618                   fim
619                   fim
620                   fim
621                   fim
622                   fim
623                   fim
624                   fim
625                   fim
626                   fim
627                   fim
628                   fim
629                   fim
630                   fim
631                   fim
632                   fim
633                   fim
634                   fim
635                   fim
636                   fim
637                   fim
638                   fim
639                   fim
640                   fim
641                   fim
642                   fim
643                   fim
644                   fim
645                   fim
646                   fim
647                   fim
648                   fim
649                   fim
650                   fim
651                   fim
652                   fim
653                   fim
654                   fim
655                   fim
656                   fim
657                   fim
658                   fim
659                   fim
660                   fim
661                   fim
662                   fim
663                   fim
664                   fim
665                   fim
666                   fim
667                   fim
668                   fim
669                   fim
670                   fim
671                   fim
672                   fim
673                   fim
674                   fim
675                   fim
676                   fim
677                   fim
678                   fim
679                   fim
680                   fim
681                   fim
682                   fim
683                   fim
684                   fim
685                   fim
686                   fim
687                   fim
688                   fim
689                   fim
690                   fim
691                   fim
692                   fim
693                   fim
694                   fim
695                   fim
696                   fim
697                   fim
698                   fim
699                   fim
700                   fim
701                   fim
702                   fim
703                   fim
704                   fim
705                   fim
706                   fim
707                   fim
708                   fim
709                   fim
710                   fim
711                   fim
712                   fim
713                   fim
714                   fim
715                   fim
716                   fim
717                   fim
718                   fim
719                   fim
720                   fim
721                   fim
722                   fim
723                   fim
724                   fim
725                   fim
726                   fim
727                   fim
728                   fim
729                   fim
730                   fim
731                   fim
732                   fim
733                   fim
734                   fim
735                   fim
736                   fim
737                   fim
738                   fim
739                   fim
740                   fim
741                   fim
742                   fim
743                   fim
744                   fim
745                   fim
746                   fim
747                   fim
748                   fim
749                   fim
750                   fim
751                   fim
752                   fim
753                   fim
754                   fim
755                   fim
756                   fim
757                   fim
758                   fim
759                   fim
760                   fim
761                   fim
762                   fim
763                   fim
764                   fim
765                   fim
766                   fim
767                   fim
768                   fim
769                   fim
770                   fim
771                   fim
772                   fim
773                   fim
774                   fim
775                   fim
776                   fim
777                   fim
778                   fim
779                   fim
780                   fim
781                   fim
782                   fim
783                   fim
784                   fim
785                   fim
786                   fim
787                   fim
788                   fim
789                   fim
790                   fim
791                   fim
792                   fim
793                   fim
794                   fim
795                   fim
796                   fim
797                   fim
798                   fim
799                   fim
800                   fim
801                   fim
802                   fim
803                   fim
804                   fim
805                   fim
806                   fim
807                   fim
808                   fim
809                   fim
810                   fim
811                   fim
812                   fim
813                   fim
814                   fim
815                   fim
816                   fim
817                   fim
818                   fim
819                   fim
820                   fim
821                   fim
822                   fim
823                   fim
824                   fim
825                   fim
826                   fim
827                   fim
828                   fim
829                   fim
830                   fim
831                   fim
832                   fim
833                   fim
834                   fim
835                   fim
836                   fim
837                   fim
838                   fim
839                   fim
840                   fim
841                   fim
842                   fim
843                   fim
844                   fim
845                   fim
846                   fim
847                   fim
848                   fim
849                   fim
850                   fim
851                   fim
852                   fim
853                   fim
854                   fim
855                   fim
856                   fim
857                   fim
858                   fim
859                   fim
860                   fim
861                   fim
862                   fim
863                   fim
864                   fim
865                   fim
866                   fim
867                   fim
868                   fim
869                   fim
870                   fim
871                   fim
872                   fim
873                   fim
874                   fim
875                   fim
876                   fim
877                   fim
878                   fim
879                   fim
880                   fim
881                   fim
882                   fim
883                   fim
884                   fim
885                   fim
886                   fim
887                   fim
888                   fim
889                   fim
890                   fim
891                   fim
892                   fim
893                   fim
894                   fim
895                   fim
896                   fim
897                   fim
898                   fim
899                   fim
900                   fim
901                   fim
902                   fim
903                   fim
904                   fim
905                   fim
906                   fim
907                   fim
908                   fim
909                   fim
910                   fim
911                   fim
912                   fim
913                   fim
914                   fim
915                   fim
916                   fim
917                   fim
918                   fim
919                   fim
920                   fim
921                   fim
922                   fim
923                   fim
924                   fim
925                   fim
926                   fim
927                   fim
928                   fim
929                   fim
930                   fim
931                   fim
932                   fim
933                   fim
934                   fim
935                   fim
936                   fim
937                   fim
938                   fim
939                   fim
940                   fim
941                   fim
942                   fim
943                   fim
944                   fim
945                   fim
946                   fim
947                   fim
948                   fim
949                   fim
950                   fim
951                   fim
952                   fim
953                   fim
954                   fim
955                   fim
956                   fim
957                   fim
958                   fim
959                   fim
960                   fim
961                   fim
962                   fim
963                   fim
964                   fim
965                   fim
966                   fim
967                   fim
968                   fim
969                   fim
970                   fim
971                   fim
972                   fim
973                   fim
974                   fim
975                   fim
976                   fim
977                   fim
978                   fim
979                   fim
980                   fim
981                   fim
982                   fim
983                   fim
984                   fim
985                   fim
986                   fim
987                   fim
988                   fim
989                   fim
990                   fim
991                   fim
992                   fim
993                   fim
994                   fim
995                   fim
996                   fim
997                   fim
998                   fim
999                   fim
1000                  fim

```

Este tipo de situação nos arquivos vetoriais pode causar tanto problemas visuais como navegacionais na aplicação que os utiliza. Um problema navegacional é gerado na aplicação que utiliza um grafo de navegação baseado nos dados do arquivo vetorial para a movimentação de veículos sobre uma estrada, por exemplo. Se a ligação entre duas estradas, que deveria existir, não foi identificada a partir dos dados, o caminho escolhido para a movimentação dos veículos pode não ser o mais apropriado, o que é um problema gravíssimo para aplicações que envolvem a simulação, onde a movimentação deve ser feita pelo melhor caminho possível. Visualmente, esta situação pode causar descontinuidades na malha dos rios/estradas.

5.2.3 Segmentos pequenos em junções

Esta situação acontece quando um segmento de uma entidade, seja ele da margem direita ou esquerda do rio/estrada, se encontra dentro das margens de outra entidade da junção como é ilustrado pela Figura 5.4 onde o segmento da margem esquerda da entidade E3 está dentro das margens da entidade E1. Para tratar este tipo de junção foram adotadas duas etapas: contração dos vértices da junção e remoção dos segmentos. A etapa de contração dos vértices é responsável por fazer com que todas as entidades que fazem parte de uma junção tenham exatamente o mesmo ponto de junção. Como mostrado pela Figura 5.4, a entidade E4 também é vista como uma entidade da junção, pois a distância entre o vértice de ligação V entre E4 e E3 para o centro da junção C é menor que a distância máxima utilizada para identificar as junções

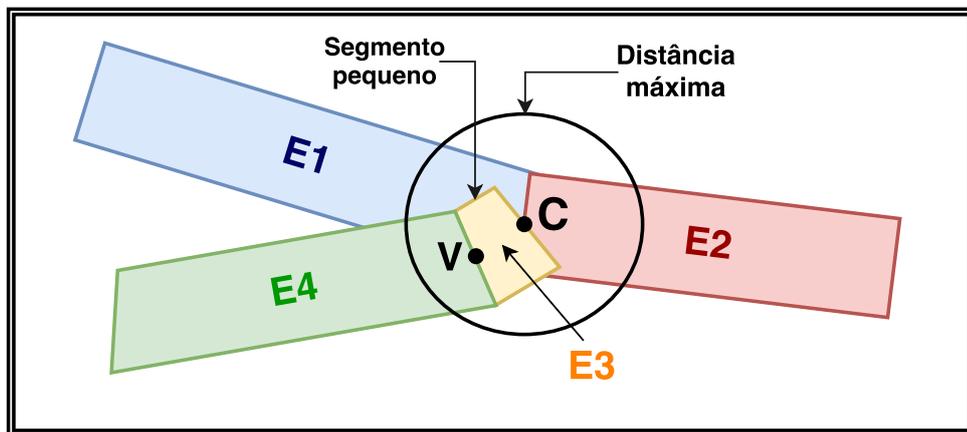


Figura 5.4 – Um exemplo de situação que é vista como uma junção tripla mas que é identificada por uma junção entre quatro entidades. Além disso, ilustra a situação onde um pequeno segmento se encontra nas junções.

Sendo assim, o vértice de ligação entre E4 e E3 da entidade E4 deve receber o mesmo valor que o centro da junção, como os pontos em junção não são compartilhados, a entidade E3 não sofre nenhuma alteração além da entidade E4. Após a contração de todos os vértices na junção, as entidades que representam os pequenos segmentos podem ser deletadas com a segurança de que não ficará nenhum segmento faltando na junção.

Na segunda e última etapa do processo, os pequenos segmentos nas junções são removidos como também as entidades somente formadas pelos mesmos. Para a identificação dos segmentos que devem ser removidos, primeiramente é iterado sobre o conjunto de entidades onde deve-se verificar em qual extremidade cada entidade liga com as entidades vizinhas, obtidas a partir do grafo. Sabendo a extremidade, é verificado se o segmento formado pelos dois

vértices naquela extremidade for menor que uma distância estipulada, o vértice mais interno deve ser removido até que o segmento for maior que a distância ou que só restam dois vértices na entidade, onde a mesma deve ser removida, caso que engloba a situação onde o segmento é uma única entidade. A Figura 5.5 mostra como as entidades da Figura 5.4 ficam após a remoção da entidade que representa o pequeno segmento na junção.

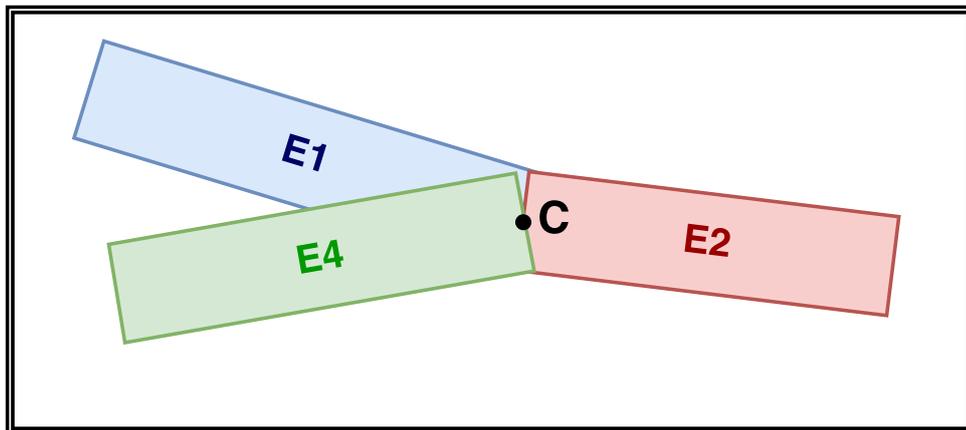


Figura 5.5 – Ilustração de como as entidades da Figura 5.4 ficam após a remoção da entidade que representa o pequeno segmento na junção.

A remoção dos pequenos segmentos na junção faz com que o processo de construção das arestas e de ajuste dos vértices na junção, abordados nas Seções 5.3.1 e 5.3.3, respectivamente, seja mais simples e plausível de se fazer, uma vez que as arestas somente serão formadas pelos dois pontos externos da entidade na junção. Além disso, a remoção destas situações garante que os problemas abordados no Capítulo 3 não aconteçam.

5.3 Criação das junções

Nesta seção é tratado o processo de criação da malha triangular, focado nas junções entre vários rios/estradas, a partir do arquivo vetorial pré-processado. A abordagem foi implementada para junções entre várias entidades que podem possuir larguras variáveis entre os vértices, desde que seja garantido que a largura é a mesma no vértice de junção, como um processo de quatro etapas: criação das arestas na junção, identificação dos pontos de intersecção, ajuste dos vértices e triangulação, que são abordadas com mais detalhes nas próximas subseções.

5.3.1 Criação das arestas

A criação das arestas na junção é a primeira etapa do processo de construção das junções entre rios/estradas. Cabe a ela, dado um conjunto de entidades que fazem parte de uma junção, criar as arestas que representam a margem esquerda e a margem direita do rio/estrada no ponto de junção para posteriormente verificar as intersecções entre as mesmas. As arestas são criadas a partir dos dois vértices externos da entidade no ponto de junção. O problema desta abordagem é que uma aresta pode intersectar várias outras e precisamos saber qual das intersecções é a que deve ser utilizada. A Figura 5.6 ilustra o caso onde uma aresta, mostrada em vermelho, possui duas intersecções I1 e I2 sobre ela mais duas intersecções I3 e I4 que representam as intersecções da continuidade da reta.

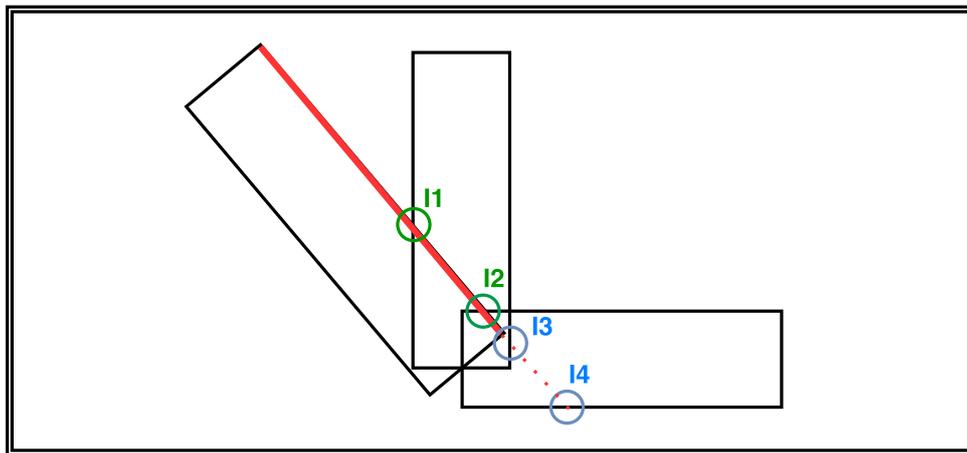


Figura 5.6 – Exemplo de situação onde uma aresta, mostrada em vermelho, intersecta várias outras arestas das entidades da junção.

Primeiramente, a criação das arestas deve garantir uma ordem entre elas, fazendo com que seja armazenada a aresta da margem esquerda, no sentido da junção, da entidade sendo analisada e posteriormente, armazenada a aresta direita, seguindo a mesma ordem para as demais entidades da junção. No final do processo de criação das arestas, uma lista com n arestas será retornada, sendo

$$n = ne * 2$$

onde ne = número de entidades. Uma junção tripla (entre três entidades), por exemplo, terá seis elementos.

5.3.2 Identificação dos pontos de intersecção

Tendo uma lista de arestas e sabendo da ordem em que elas estão armazenadas, é possível restringir a comparação entre as arestas de uma com todas as outras para a metade, pois como todas as arestas são criadas levando em consideração o sentido da junção, uma aresta da margem esquerda de um rio/estrada, por exemplo, nunca vai ser a intersecção correta de outra margem esquerda. Nota-se pela Figura 5.7, que mostra uma junção tripla e os pontos de intersecção encontrados, que as intersecções corretas sempre acontecem entre as margens esquerdas (E1, E2, E3) e as direitas (D1, D2, D3) ou vice-versa. Mesmo assim, uma aresta continua podendo intersectar várias outras, mas devido a restrição na comparação entre as arestas, é possível escolher a intersecção a partir do ângulo entre elas.

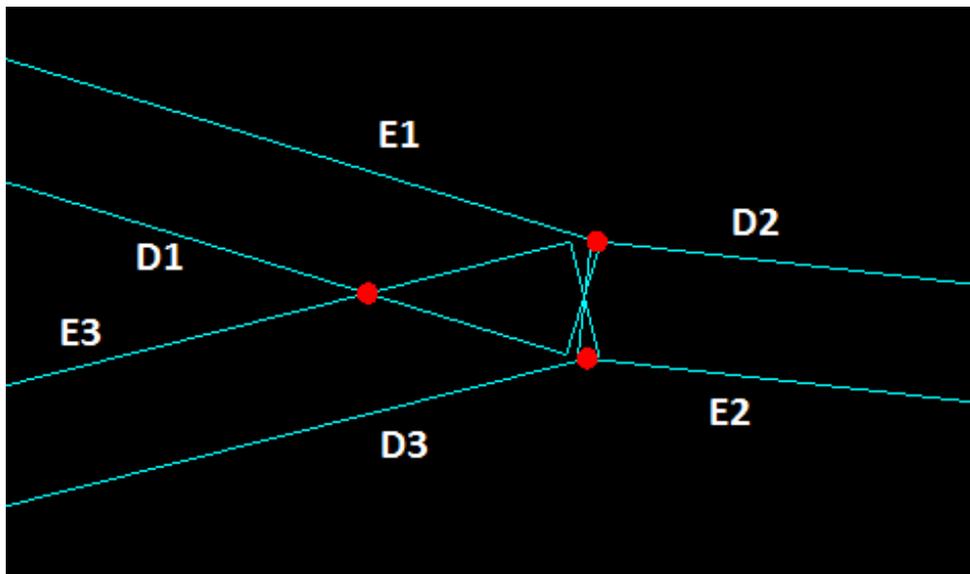


Figura 5.7 – Figura que ilustra um conjunto de entidades em uma junção e suas margens direitas e esquerdas juntamente com os pontos de intersecção escolhidos.

A Figura 5.8.a mostra uma aresta da margem esquerda de uma entidade sendo comparada com todas as arestas da margem direita das entidades da junção da Figura 5.7, exceto a sua própria. A intersecção escolhida deve ser a que contém o menor ângulo no sentido horário entre os vetores direção das arestas sendo analisadas. Caso uma aresta da margem direita esteja sendo comparada, a intersecção escolhida deve ser a que contém o menor ângulo anti-horário ou o maior ângulo horário entre os vetores direção, como mostrado pela Figura 5.8.b.

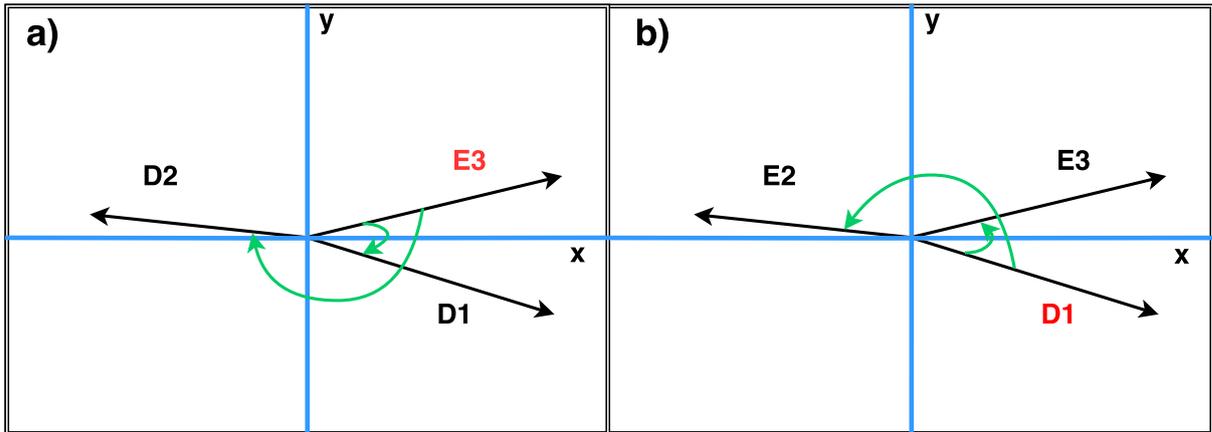


Figura 5.8 – a) Mostra a margem esquerda da entidade três (E3) sendo comparada com todas as margens direita das demais entidades. b) Mostra o mesmo caso de a) partindo da margem direita da entidade um (D1).

Um caso especial a ser tratado é quando duas arestas são paralelas, que normalmente retornará uma intersecção no infinito. Ao identificar que duas arestas são paralelas, o ponto de intersecção entre elas pode ser o ponto médio entre os pontos finais das mesmas como é mostrado na Figura 5.9.

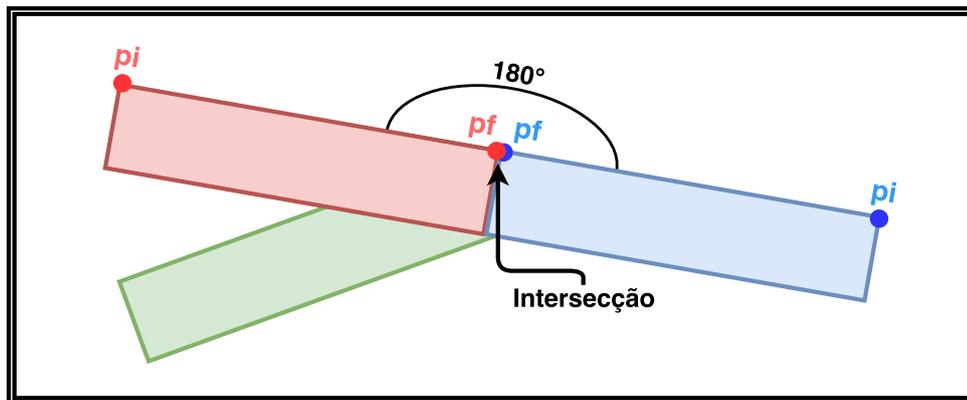


Figura 5.9 – Ilustração de uma intersecção entre duas arestas paralelas compostas pelos pontos iniciais (pi) e finais (pf).

5.3.3 Ajuste dos vértices

Sabendo os dois pontos de intersecção da entidade sendo comparada na junção, é necessário retirar os vértices da entidade que ficarão dentro da junção, o que é relativamente simples após a remoção de pequenos segmentos abordado na Seção 5.2.3. Para remover os vértices de dentro da junção, o vértice da margem esquerda de uma entidade, na extremidade da junção deve assumir o valor da intersecção da margem esquerda e o vértice da margem direita deve

assumir o valor da intersecção da margem direita. No final do processo, a malha do rio/estrada estará pronta, exceto na junção, que até então possui um buraco como mostra a Figura 5.10.

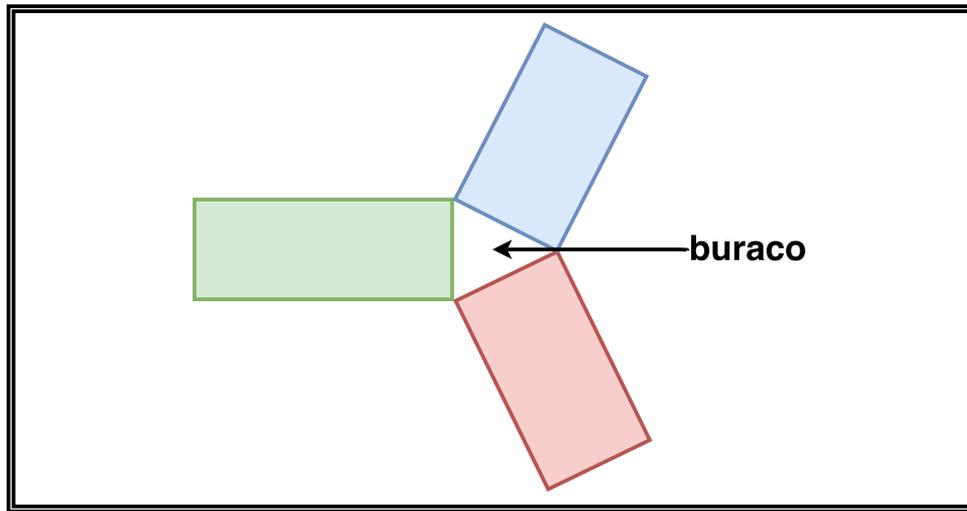


Figura 5.10 – Ilustração da malha em uma junção após a etapa de ajuste dos vértices.

5.3.4 Triangulação

Como etapa final, os vértices referentes a junção devem ser criados a ponto de completar a malha do rio/estrada. Para isso, é necessário armazenar as intersecções encontradas entre as arestas de uma junção em um estrutura que permite a ligação das intersecções com a junção que elas pertencem. A estrutura usada faz o uso dos identificadores das entidades que fazem parte da junção como forma de ligação entre os pontos de intersecção e a junção que eles pertencem. A cada novo ponto de intersecção encontrado, deve-se verificar se a estrutura correspondente a junção já possui aquele ponto. Caso a estrutura não contém o ponto, o mesmo deve ser adicionado a ela. Tendo a estrutura completa, a construção da junção é feita de forma simples, pois os polígonos gerados pelas intersecções são simples de triangular.

Para criar os triângulos que representam a área da junção, é necessário que os vértices sejam passados seguindo uma ordem que irá determinar a face dos triângulos. Como a adição dos pontos de intersecção na estrutura não garante nenhuma ordem entre eles, os pontos devem ser ordenados para garantir que todos os triângulos sigam a mesma ordem. Para isso, é usado o algoritmo *bubble sort*, que basicamente verifica o ângulo entre os vetores direção de cada ponto em relação ao ponto central dos mesmos, que pode ser facilmente encontrado a partir da média entre eles. Caso o ângulo seja maior que zero, os dois pontos que estão sendo analisados devem ser trocados.

Para junções entre três rios/estradas, o polígono formado na junção já é um triângulo. Sendo assim, os três vértices referentes ao triângulo são armazenados dentro da estrutura que contém os demais vértices da malha, cuidando para que a ordem em que os vértices são armazenados esteja de acordo com a ordem utilizada para os demais. Já para junções entre quatro rios/estradas, o polígono é um retângulo retorcido, que pode ser facilmente construído a partir de dois triângulos. Para junções acima de quatro rios/estradas, é adicionado um ponto no centro do polígono convexo formado pelos pontos de intersecção e a partir disso são criados triângulos formados pelo ponto central e dois pontos de intersecção, como é ilustrado pela Figura 5.11.

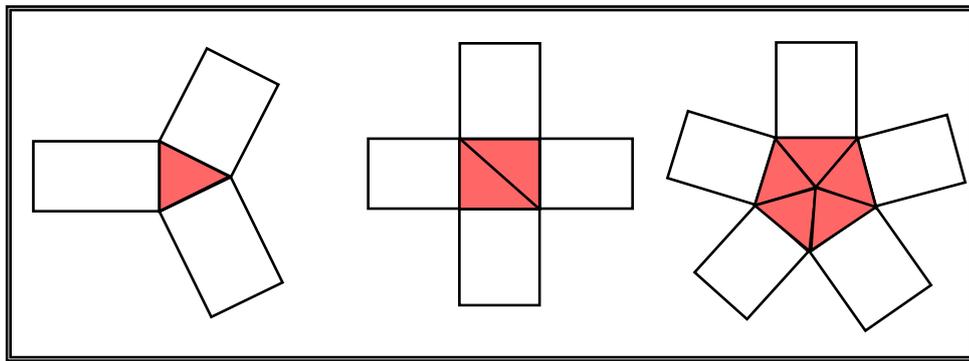


Figura 5.11 – Ilustração da abordagem utilizada para a triângulação do polígono convexo formado pelos pontos de intersecção na junção para três, quatro e demais números de elementos.

6 RESULTADOS

A automatização do processo de criação de uma malha poligonal para rios/estradas a partir de um arquivo vetorial possui diversos desafios. O maior deles é a grande quantidade de situações possíveis encontradas nos arquivos vetoriais que podem se tornar complexas durante o desenvolvimento da solução. Sendo assim, a solução proposta procurou tratar de forma automatizada algumas situações encontradas durante o desenvolvimento, enquanto outras, cabe ao usuário corrigi-las.

A Figura 6.1 mostra algumas junções entre estradas criadas a partir da malha gerada pela solução proposta.

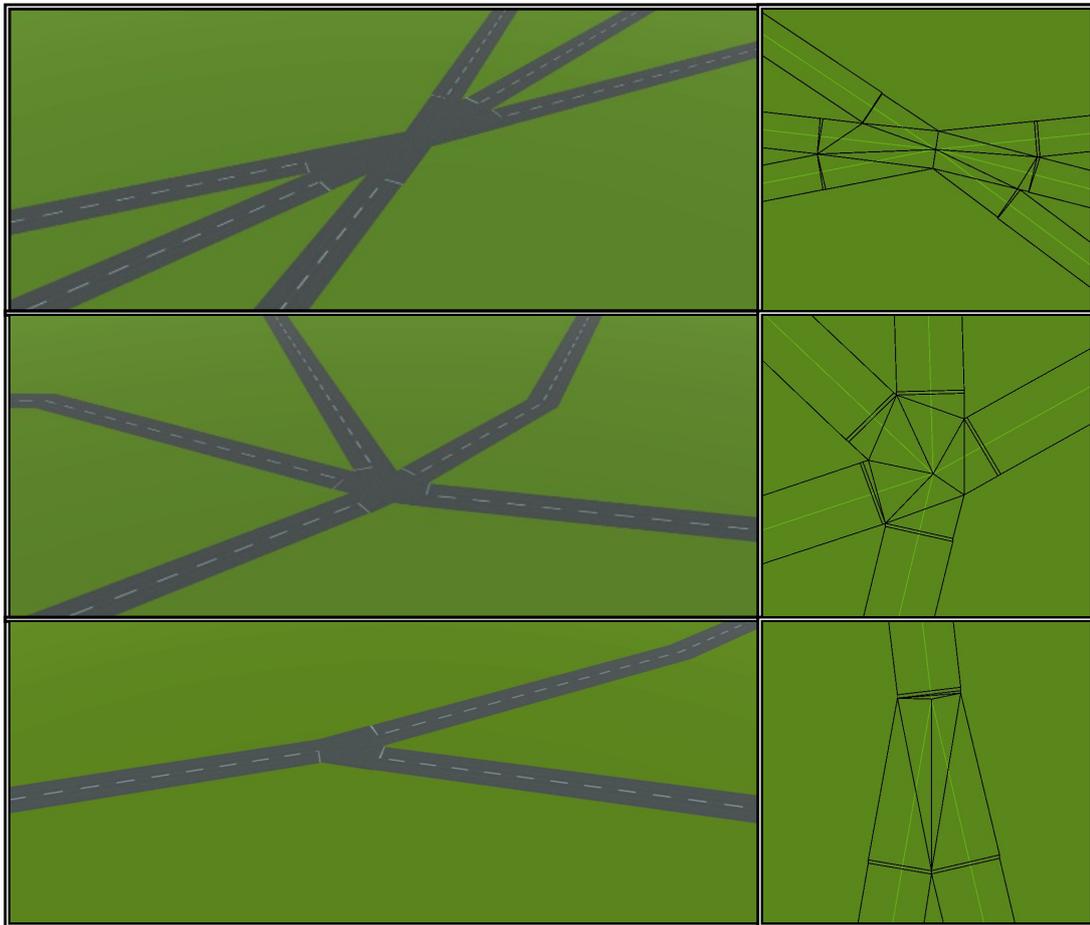


Figura 6.1 – Resultados obtidos a partir da solução proposta.

A solução proposta mostrou ter bom desempenho por ser focada no pré-processamento das informações e eficaz quando não há nenhum segmento pequeno na junção. A solução utilizada para a remoção dos segmentos pequenos na junção somente leva em consideração uma distância mínima entre os vértices na junção. Não foi definida uma equação genérica para

a remoção de todas as situações possíveis.

Os testes foram realizados utilizando largura fixa para os rios/estradas, porém a solução funciona para larguras arbitrárias em cada ponto desde que a largura seja a mesma no ponto de junção entre entidades. O principal problema de se ter larguras arbitrárias é que o ponto de intersecção pode estar mais distante do centro da junção. Isso faz com que as chances do ponto de intersecção estar em um segmento que não é o segmento final da entidade seja maior, fazendo com que erros possam acontecer no processo de criação da malha. A Figura 6.2 mostra uma ilustração dessa situação.

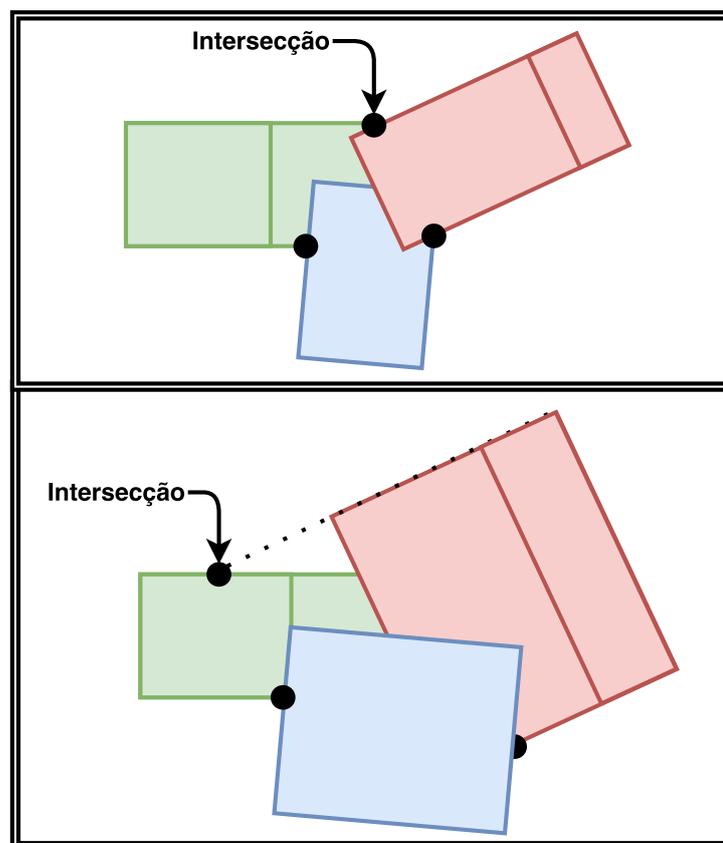


Figura 6.2 – Ilustração de uma junção e os pontos de intersecção que seriam encontrados utilizando largura fixa e largura arbitrária por entidade.

6.1 Análise de desempenho

Os testes foram realizados em um computador Core i5 6400 com 16GB de RAM, Windows 10 64 bits e utilizando a interface de desenvolvimento Visual Studio 2015. Os tempos mostrados pelas Tabelas 6.1 e 6.2 são os tempos de execução individuais de cada etapa e que foram obtidos a partir da média de dez execuções de acordo com os seguintes cenários:

- C1 (1706 entidades, 14826 pontos, 9208 junções e área de 27.7km x 27.7km)
- C2 (2033 entidades, 27774 pontos, 3834 junções e área de 30.2km x 56.1km)

Tabela 6.1 – Análise de desempenho da construção do grafo com e sem o *spatial hashing*.

Item	Tempo de C1 (Segundos)	Tempo de C2 (Segundos)
Construção do grafo com <i>spatial hashing</i> (100 subdivisões)	0.089	0.280
Construção do grafo com <i>spatial hashing</i> (10 subdivisões)	1.143	8.301
Construção do grafo sem <i>spatial hashing</i>	28.709	69.431
Construção do hash	0.004	0.007

Os resultados da Tabela 6.1 mostram uma grande diferença de desempenho entre a criação do grafo usando o *spatial hashing* e a força bruta e como o número de subdivisões na estrutura do *spatial hashing* pode afetar no desempenho do mesmo. Além disso, mostra como o tempo necessário para a construção da estrutura do *spatial hashing* é praticamente insignificante.

Tabela 6.2 – Análise de desempenho individual das principais etapas da solução proposta.

Item	Tempo de C1 (Segundos)	Tempo de C2 (Segundos)
Remoção das entidades que ligam no meio de outras entidades	0.164	0.627
Identificação das entidades que não estão conectadas com outras entidades próximas	0.984	2.614
Remoção dos pequenos segmentos nas junções	0.196	0.412
Criação da malha	2.187	1.254

Tabela 6.3 – Número de situações encontradas em cada etapa de pré-processamento.

Item	Situações encontradas em C1	Situações encontradas em C2
Remoção das entidades que ligam no meio de outras entidades	0	282
Identificação das entidades que não estão conectadas com outras entidades próximas	3	1132
Remoção dos pequenos segmentos nas junções	8	38

Pelas tabelas 6.2 e 6.3 nota-se que o tempo de identificação das entidades que não estão conectadas com outras entidades próximas é maior para C2 devido ao seu maior número de pontos. Além disso, devido a alta quantidade de situações encontradas nesta etapa para C2, o número de junções identificadas é menor que C1 apesar de C1 conter menos entidades que C2. O número de junções impacta diretamente no desempenho da criação da malha.

7 CONCLUSÃO

A disponibilização gratuita de dados de GIS teve papel fundamental no processo de popularização deste tipo de dado e no desenvolvimento de diversas aplicações focadas na edição, armazenamento e visualização dos mesmos. Porém, soluções para a geração de características vetoriais em terrenos como rios/estradas a partir de dados geográficos reais, que possivelmente podem conter erros que devem ser tratados a fim de garantir a corretude da informação utilizada em sistemas de simulação, são de certa forma restritas ou estão em ferramentas comerciais relativamente caras.

Sendo assim, é mostrada uma solução para o processo de criação de uma malha poligonal para rios/estradas, focada na construção das junções sem sobreposições ou buracos, usada no processo de renderização dos rios/estradas sobre terreno. O trabalho demonstra as principais técnicas e situações que foram levadas em consideração no processo de criação da malha como também as principais otimizações e alterações realizadas na estrutura do arquivo vetorial para o mesmo.

A implementação buscou tratar, levando em consideração o tempo disponível e a quantidade de situações possíveis encontradas nos arquivos vetoriais, os principais problemas encontrados durante o desenvolvimento. Os resultados mostram que a solução tem desempenho relativamente bom e é sólida pois garante que a criação das junções seja feita de forma correta após as etapas de pré-processamento e correção do grafo. Além disso, a ferramenta permite que tanto as informações vetoriais quanto a malha poligonal gerada possam ser exportadas e facilmente carregadas em outras aplicações.

7.1 Trabalhos futuros

- **Identificação de pequenos segmentos nas junções.** Desenvolvimento de estratégias para a identificação de pequenos segmentos nas junções baseado na largura do rio/estrada.
- **Renderização.** Desenvolvimento de técnicas para a renderização utilizando a malha gerada sobre o terreno.

REFERÊNCIAS

- BERKHAHN, V. et al. A hybrid meshing scheme based on terrain feature identification. In: INTERNATIONAL MESHING ROUNDTABLE, IMR 2005, 14. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2005. p.129–145.
- BRUNETON, E.; NEYRET, F. Real-Time Rendering and Editing of Vector-based Terrains. **Computer Graphics Forum**, [S.l.], 2008.
- CAMPBELL, J.; SHIN, M. **Essentials of Geographic Information Systems**. [S.l.]: Flat world knowledge, 2011.
- ESRI. Acessado: 29-11-2016, <https://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf>.
- GDAL. Acessado: 20-10-2016, <http://www.gdal.org>.
- GODARD, V. **Differents types de cartes**. 2015.
- HASTINGS, E. J.; MESIT, J.; GUHA, R. K. Optimization of large-scale, real-time simulations by spatial hashing. In: SUMMER COMPUTER SIMULATION CONFERENCE, 2005. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2005. v.37, n.4, p.9–17.
- KAREN SCHUCKMAN, J. A. D. **Elevation Data Products - GEOG 480 Exploring Imagery and Elevation Data in GIS Applications**. 2014.
- MCCRAE, J.; SINGH, K. Sketch-based Path Design. In: GRAPHICS INTERFACE 2009, Toronto, Ont., Canada, Canada. **Proceedings...** Canadian Information Processing Society, 2009. p.95–102. (GI '09).
- NURSEITOV, N. et al. Comparison of JSON and XML Data Interchange Formats: a case study. **Caine**, [S.l.], v.2009, p.157–162, 2009.
- OBJECT Files. Acessado: 29-11-2016, http://www.cs.utah.edu/~boulos/cs3505/obj_spec.pdf.
- OUTERRA. Acessado: 29-11-2016, <http://www.outerra.com/>.

POZZER, C. T.; LARA PAHINS, C. de; HELDAL, I. A Hash Table Construction Algorithm for Spatial Hashing Based on Linear Memory. **Proceedings of the 11th Conference on Advances in Computer Entertainment Technology**, [S.l.], n.November, p.35:1—35:4, 2014.

TERRAVISTA Terrain Generation. Acessado: 29-11-2016, http://www.presagis.com/products_services/products/modeling-simulation/content_creation/terra_vista/.

THE JSON Data Interchange Format. Acessado: 29-11-2016, <http://www.ecma-international.org/publications/files/ECMA-ST/ECMA-404.pdf>.

WIKIPEDIA. Acessado: 28-11-2016, <https://en.wikipedia.org/wiki/Shapefile>.

WIKIPEDIA. Acessado: 29-11-2016, https://en.wikipedia.org/wiki/Moore_neighborhood.