



Instituto de Matemática Pura e Aplicada - IMPA
Mestrado em Matemática (opção Computação Gráfica)
Dissertação de Mestrado

Métodos para Criação de Terrenos Baseados em Traços

Leandro Moraes Valle Cruz

Orientador: Luiz Velho

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2011



Instituto de Matemática Pura e Aplicada – IMPA
Mestrado em Matemática (opção Computação Gráfica)
Dissertação de Mestrado

Autor: Leandro Moraes Valle Cruz
lcruz@impa.br

Orientador: Luiz Velho
lvelho@impa.br

Métodos para Criação de Terrenos Baseados em Traços

Dissertação de Mestrado, apresentada em 01 de março de 2011, no Instituto de Matemática Pura e Aplicada - IMPA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Matemática, opção Computação Gráfica.

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2011

Métodos para Criação de Terrenos Baseados em Traços

Leandro Moraes Valle Cruz

Banca Examinadora:

Luiz Carlos Pacheco Rodrigues Velho (orientador) - IMPA

Luiz Henrique de Figueiredo - IMPA

Paulo Cezar Pinto Carvalho - IMPA

Diego Fernandes Nehab (suplente) - IMPA

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2011

Agradecimentos

Agradeço aos meus familiares e amigos, que me apoiaram em minha jornada que me trouxe até este ponto. Ao VISGRAF, e a meus colegas de laboratório, pelo ambiente frutífero à pesquisa, debates acadêmicos, além dos filosóficos, e trocas de ideias e ideais. Em especial, ao meu orientador, o Prof. Luiz Velho, que além de nortear este trabalho, ajudou muitas vezes com incentivos e elogios. Ao IMPA, pela infraestrutura e incentivo ao crescimento acadêmico. E ao CNPq, que me financiou uma bolsa de mestrado.

Resumo

Embora já seja uma área bem estabelecida em computação gráfica, ainda tem-se feito muitas pesquisas sobre criação e visualização de terrenos. Essas pesquisas aproveitam a possibilidade de explorar aspectos de modelagem (representação, especificação e síntese) de terrenos baseada em sketches, processamento paralelo em GPUs, utilização de dados topográficos reais, e outros. Neste trabalho, apresentamos uma análise do estado da arte da área, visando identificar possibilidades, desafios e tendências, e apontar para possíveis trabalhos futuros.

Os métodos de síntese podem ser agrupados em *ontogenéticos*, que buscam construir modelos visualmente satisfatórios, e *teleológicos*, que buscam construir modelos geomorfologicamente coerente. Ao longo deste trabalho discutiremos o termo “geomorfologicamente coerente”, relacionando tais métodos com fenômenos naturais que afetam a topografia da Terra.

Apresentaremos uma forma para especificar relevos a partir de sketches, tais como, bases, silhuetas e linhas guias. A maioria dos trabalhos, que usam sketches para criar terrenos, utilizam prioritariamente curvas de silhueta. Acreditamos, porém, que abordar o problema utilizando também outras classes de curvas nos permitirá construir modelos mais realistas utilizando, ainda, poucos traços.

Durante o desenvolvimento deste trabalho foi implementado um *framework* para criação e visualização de terrenos. Com esta ferramenta, desenvolvemos alguns aplicativos cujo objetivo é testar os conceitos apresentados ao longo desta pesquisa. Além do processo de especificação e síntese, também abordamos alguns aspectos de visualização como representação de um terreno com uma malha em multirresolução, adaptada de acordo com o ponto de vista, e tópicos referentes a textura.

Abstract

Although it is an already well-established area in computer graphics, many studies in synthesis and visualization of terrain are being done nowadays. These studies take advantage of the opportunities of exploring the aspects of sketch-based modeling, parallel processing on GPU's, the use of real topographic data, among others. In this paper, we present an analysis of the state of the art in the area. We aim to identify opportunities, challenges and trends in modeling and visualization of terrain. And we identify possible future works.

The synthesis methods can be grouped into *ontogenetic* methods, which seek to build visually satisfactory models, and *teleological* methods, which seek to build geomorphologically coherent models. Throughout this paper, we will discuss the term "geomorphologically coherent", relating these methods with the natural phenomena that influence the formation of Earth's topography.

We will show a way to specify landforms using sketches of base and of silhouette and of guide lines. Most of the researches to creation of terrains uses, primarily, sketches of silhouette. However, we believe that we can approach this problem using other classes of curve, what will allow us to build realistic models of terrain using, yet, fewer traces.

During the development of this work, we implemented a framework to synthesis and visualization of terrains. With this tool, we created some applications to test some concepts presented throughout this work. Besides of the specification process and synthesis of landforms, we also addressed some visual aspects such as representation of land with a mesh in multi-resolution, which was adapted according to the point of view, and topics related to texture.

Sumário

Resumo	ix
Abstract	xi
1 Introdução	1
2 Modelagem de Terrenos	5
2.1 O Princípio da Modelagem de Terrenos	5
2.2 Representações de Terrenos	7
2.3 Métodos Ontogenéticos	9
2.4 Métodos Teleológicos	17
2.5 Tendências em Síntese de Terrenos	18
3 Especificação de Terrenos utilizando Traços	21
3.1 Silhuetas	22
3.2 Bases e Linhas Guias	26
3.3 Outros Traços	36
4 Visualização de Terrenos	43
4.1 Elementos do Terreno	43
4.2 Estruturas Geométricas	46
4.3 Texturas	48

5	Autoria de Terrenos	55
5.1	Aplicações Existentes	55
5.2	Sketch-based Terrain	58
6	Conclusão	69
	Referências Bibliográficas	73

Lista de Figuras

2.1	Representações de terrenos.	7
2.2	Terrenos que podem e não podem ser representados por mapa de altura.	8
2.3	Invariância simétrica em Curvas Fractais.	10
2.4	Processo de divisão de objetos eclideanos.	11
2.5	Iterações do algoritmo de geração de curvas Fractais por Deslocamento do Ponto Médio.	12
2.6	Processo de divisão de uma curva fractal.	13
2.7	Processo de subdivisão no algoritmo DPM.	13
2.8	Curvas com diferentes dimensões fractais.	14
2.9	Superfície com dimensão fractal.	15
2.10	Identificação da dimensão fractal de um terreno real	16
3.1	Categorias de Sketches.	22
3.2	Elementos construtivos utilizados no Harold.	23
3.3	Relevos com a função de altura do Harold.	23
3.4	Abordagens para construção da curva da base a partir da silhueta.	24
3.5	Construção do relevo no Terrain Sketching.	25
3.6	Construção inicial da base no Terrain Sketching.	25
3.7	Construção do relevo usando múltiplas silhuetas.	26
3.8	Base e Linha Guia.	27
3.9	Relevo gerado com função $h(p) = \inf_{q \in B} p - q $	28
3.10	Relevos com diferentes funções de perfil.	29

3.11	Exemplos de Relevos gerados com variações da Funções de Perfil. . .	30
3.12	Encostas.	30
3.13	Função de altura baseada na base e na linha guia.	31
3.14	Linha guia discreta.	32
3.15	Caso de Linha Guia contínua.	33
3.16	Relevos gerados com linha guia contínua.	34
3.17	Relevos cuja linha guia são curvas contínuas e fechadas.	35
3.18	Geração de Relevos por Linhas guias e Pseudo-Silhueta.	37
3.19	Níveis de Sketches.	39
4.1	Biosfera.	44
4.2	Tipos de Relevos.	46
4.3	Estruturas da Malha.	47
4.4	Síntese de cor por altura.	49
4.5	Ruído de Perlin.	50
4.6	Síntese de Textura por exemplar.	51
4.7	Síntese de Textura em Multiescala.	52
4.8	Diferentes pontos de vista do Kilimanjaro, como exemplo de variações de informações em escalas distintas.	53
5.1	Softwares para modelagem de terreno.	56
5.2	Interface do software Bryce.	57
5.3	Arquitetura do Framework.	58
5.4	Especificação de Relevos.	59
5.5	Tipos de relevos.	59
5.6	Aplicação de Modelagem.	60
5.7	Paisagem colorida.	61
5.8	Shading e Colorização.	62
5.9	Sketches de diferentes camadas.	63
5.10	Pontos de vista de um relevo.	64
5.11	Busca de Relevos.	64
5.12	Aplicação de Mapeamento de Textura.	67

5.13 Mapeamento de textura. 67
5.14 Blending de Textura. 67

Capítulo 1

Introdução

Alguns dos principais métodos para geração de terrenos foram apresentados do fim da década de 1970 até o início da década de 1990. Uma motivação para o desenvolvimento deste trabalho é que, embora não seja uma área recente, ainda se tem feito muita pesquisa em modelagem (especificação, representação e síntese) e visualização de terrenos. Desta forma, a partir de uma análise do estado da arte, procuramos identificar as principais possibilidades, desafios e tendências da área.

Outra motivação é utilizar as possibilidades da área de Modelagem e Interfaces baseadas em Sketches para aplicar no processo de criação de terrenos. Esta motivação origina-se da complexidade das interfaces das principais aplicações da área. Estas interfaces não são intuitivas, pois comumente, essas aplicações utilizam técnicas procedurais de modelagem. Para parametrizar esses métodos o usuário precisa ter uma certa experiência para conseguir gerar um modelo com as características desejadas. Em contrapartida adotamos uma abordagem da qual o processo de especificação é, prioritariamente, baseado em sketches.

As principais contribuições deste trabalho são:

- Um estudo bibliográfico sobre os principais trabalhos na área de síntese e visualização de terrenos.
- Conceituação de um framework para criação de terrenos utilizando sketches.

- Identificação dos principais requisitos de uma aplicação de síntese e visualização de terrenos.
- Construção de um framework e de aplicações para modelagem e visualização de terrenos, com uma abordagem intuitiva para o usuário e capaz de gerar modelos realistas.

No desenvolvimento deste trabalho, o processo de síntese de terrenos foi pensado a partir de uma análise de informações geomorfológicas, entendendo os principais biomas terrestres, em particular os presentes no Brasil; entendendo como funciona os ecossistemas e como estes se relacionam; identificando tipos de relevos e suas principais características (geométricas e visuais). A partir desse estudo pretendemos conseguir criar modelos coerentes com classes de terrenos reais. Desse estudo, foram produzidos um relatório técnico com coletâneas de informações sobre biomas e relevos [1], assim como uma base de dados com uma coletânea de fotografias sobre o mesmo tema [2].

Nesta direção, acreditamos que uma boa opção para modelagem de paisagens muito extensas (como um planeta virtual, por exemplo) pode ser feita utilizando uma divisão presente na natureza. Ou seja, o processo de modelagem inicia-se especificando áreas continentais. Os continentes são divididos em biomas. Em cada bioma define-se os relevos. Nessas diferentes camadas, é possível adicionar informações geométricas (parâmetros para métodos de síntese) e visuais (parâmetros de textura). Por exemplo, uma região com uma floresta pode ser visualizada com uma textura predominantemente verde, enquanto regiões com desertos são visualizadas com uma textura semelhante a areia. Além disso, podem haver relevos cujo solo e vegetação se destacam do que é normalmente encontrado nas demais partes do bioma ao qual este pertence. Neste caso, pode-se utilizar uma textura específica para este relevo.

Devido a variedade de biomas, relevos, formações rochosas, solos e vegetações há uma grande variedade de classes de texturas que podem ser associadas a um modelo gerado. Porém, foge ao escopo dessa pesquisa um estudo exaustivo de categorização e síntese dessa sorte de texturas.

A natureza é visualmente muito complexa. O principal objetivo na modelagem de um ambiente virtual é reproduzir os elementos do ambiente modelado com realismo. O termo “realismo” neste contexto é ambíguo. Há uma corrente que defende que este consiste em combinar a geometria do objeto com seus atributos visuais para obter uma representação visualmente satisfatória (note que essa é a principal defesa dessa corrente: “uma representação visualmente satisfatória”). Outra linha defende a criação de modelos virtuais que respeitam as características geomorfológicas do respectivo relevo real (e conseqüentemente garantindo ainda a qualidade visual). Muitos métodos procedurais produzem modelos que, embora sejam visualmente satisfatórios, são geomorfológicamente incoerentes. Em contrapartida, esses métodos são mais simples de entender e implementar, além de ter um desempenho melhor do que os que resultam em modelos geomorfológicamente corretos. Apresentaremos mais adiante trabalhos em ambas linhas. Mediante essa dualidade, procuramos propor métodos com um compromisso em gerar modelos visualmente satisfatórios, com uma certa coerência geomorfológica, apresentando um desempenho razoável, sem acrescentar grandes dificuldades de implementação.

Apresentaremos neste trabalho métodos relacionados a modelagem e visualização de terrenos.

Os métodos de modelagem procuram criar modelos cuja geometria seja semelhante a alguma categoria de relevo real. O termo “modelagem de terrenos” é utilizado em dois contextos distintos. O primeiro consiste em criar um modelo geométrico que represente algum terreno real. O segundo, consiste em sistematizar o processo de criação de modelos para terrenos sintéticos. Nessa dissertação, o termo “modelagem de terrenos” possui o segundo significado. Para tal, procuramos abordar as técnicas de representação, especificação e síntese de terrenos.

Os métodos de visualização consistem em um modo sistemático de exibir esse modelo, acrescido de seus atributos visuais (como textura e iluminação). Neste trabalho, o processo de visualização foi abordado minimalistamente. Ou seja, fuge ao nosso escopo técnicas de visualização realistas e de alta performance.

Logo, criar um terreno significa definir sua geometria e seus atributos visuais. Essa dualidade é coerente com a presente na natureza. O que percebemos de um

terreno são suas características geométricas, dada pela topografia, e as visuais, determinadas pelo solo e vegetação. Embora não muito estudado neste trabalho, ainda podemos pensar em representações de elementos mais específicos, como os seres vivos e as construções. Estes podem ser representados de diferentes formas, de acordo com o ponto de vista. Por exemplo, é interessante utilizar um modelo 3D de uma árvore, caso esta esteja sendo visualizada de perto. Se este objeto estiver mais distante, billboards podem ser uma representação satisfatória. Visto a uma distância suficientemente grande, não conseguimos identificar uma árvore. Desta forma, podemos representar um conjunto de árvores (floresta) através de uma textura. Analogamente, podemos representar construções/cidades, outros elementos da vegetação e da paisagem com objetos 3D, billboards ou texturas.

Esta dissertação está dividida em, além deste capítulo introdutório, mais quatro capítulos e a conclusão. No Capítulo 2, apresentaremos os principais trabalhos sobre modelagem de terrenos, destacando as técnicas de representação (Seção 2.2), os métodos que criam modelos visualmente satisfatórios (Seção 2.3) e os métodos geomorfologicamente coerentes (Seção 2.4). No Capítulo 3, apresentaremos o processo de especificação de terrenos usando sketches, apresentando alguns trabalhos preliminares baseados na silhueta (Seção 3.1), nossa abordagem baseada na base e em linhas guias (Seção 3.2) e em outras classes de sketches (Seção 3.3). No Capítulo 4, discutiremos temas referentes à visualização de terrenos, como representação dos elementos (Seção 4.1), estruturas geométricas (Seção 4.2) e textura (Seção 4.3). No Capítulo 5, discutiremos alguns temas referentes a autoria de terrenos, apresentando algumas aplicações existentes (Seção 5.1) e explicando as aplicações desenvolvidas neste trabalho (Seção 5.2). Finalmente, na conclusão procuramos rever os principais resultados deste trabalho e apontar os trabalhos futuros.

Capítulo 2

Modelagem de Terrenos

2.1 O Princípio da Modelagem de Terrenos

O primeiro a observar a possibilidade de utilizar o Movimento Browniano para a geração de curvas e superfícies que se assemelhavam a formas presentes na natureza foi Benoit B. Mandelbrot. Em 1975, ele apresentou um trabalho [3] que mostrava como usar modelos estocásticos para gerar objetos cuja geometria assemelhava-se a um morro/montanha (ou cadeia de morros/montanhas). Além disto, nesse trabalho ele mostrou que o formato da linha costeira dos continentes e ilhas possuem dimensão fractal. Em 1983, ele publicou o livro *The Fractal Geometry of Nature* (A Geometria Fractal da Natureza) [4] abordando a construção de modelos fractais. Neste livro, foram apresentadas algumas constatações interessantes para modelagem de terrenos. Entre estas, pode-se destacar o fato de que olhando para o horizonte a silhueta vista de uma cadeia de morros é uma curva com dimensão fractal; que mapas são compostos por elementos fractais (as fronteiras e as costas continentais são curvas fechadas com dimensão fractal, além do fato que os rios e as estradas são representados por cadeias de curvas, também com dimensão fractal). Além disso, o estudo de construção de superfícies com dimensão fractal, muito utilizado para a construção de relevos, foi estendido; foi introduzido a possibilidade de gerar texturas a partir de modelos fractais; entre outras contribuições para a área.

Outro trabalho pioneiro, que apresenta uma abordagem para criação de terrenos, foi apresentado em 1982 por Fournier et al. [5]. Nele, os autores apresentaram, de modo sistemático, uma abordagem para construir contornos e superfícies que pudessem ser usadas no processo de modelagem de terrenos. Este trabalho é contemporâneo aos resultados de Mandelbrot (e foram incluídos no livro [4] deste autor lançado pouco tempo após a publicação do artigo). Ambos utilizavam *Movimento Browniano Fractal* (fBM, do inglês *fractal Brownian Motion*) para definir curvas fechadas, semelhantes a costas e fronteiras; curvas abertas, semelhantes a rios e estradas; e superfícies, semelhantes à topografia de um terreno.

A maioria das técnicas procedurais para geração de terrenos baseiam-se em geradores de ruídos fractais. Essa abordagem foi introduzida por Fournier et al. [5], seguido por Perlin [6] e Miller [7]. A menos de uma escolha específica de qual método será utilizado em cada região, técnicas procedurais baseadas em Movimento Browniano Fractal produzem terrenos com as mesmas características estatísticas locais em todo o modelo. Em contrapartida, foram apresentadas outras abordagens procedurais que consistem em utilizar métodos de simulação baseados em fenômenos físicos. Musgrave et al. [8] apresentaram técnicas para simular erosão no terreno. Neste trabalho, foi apresentada uma técnica, baseada em fenômenos hidráulicos e térmicos, capaz de criar vales e encostas erodidas, além de suavizar áreas pontiagudas dos relevos. Benes e Forsbach [9] apresentaram uma nova representação para terrenos baseada em aspectos geológicos reais que apresenta um bom equilíbrio entre a representação como mapa de altura e a representação por voxel.

A utilização de modelos fractais para gerar objetos naturais provoca uma discussão da qual se pode argumentar amplamente a favor e contra. Porém, acredito que a melhor resposta é que a escolha do método depende do propósito. Fractais são bons para modelar objetos que tenham a propriedade de invariância por escala (pelo menos em algumas escalas). Logo, fractais podem ser boas primitivas para modelar esses objetos na escala adequada. Na prática, a geometria de um relevo é acompanhada de atributos visuais, como textura. Essa combinação eleva a qualidade visual do modelo satisfazendo os requisitos de determinadas aplicações, mesmo que o modelo não seja geomorfologicamente correto.

Essa defesa da utilização de superfícies fractais para modelar terrenos segue a linha da *Modelagem Ontogenética*. O termo *ontogênese* pode ser compreendido como algo baseado em características morfológicas visíveis (dicionário Webster Collegiate). Em contrapartida, outros métodos procedurais baseados em fenômenos físicos seguem a linha de *Modelagem Teleológica*. O termo *teleologia* consiste em algo baseado em estudos de evidências de formas na natureza (segundo o mesmo dicionário).

Neste capítulo, apresentaremos o estado da arte da modelagem de terrenos. Inicialmente, falaremos, na Seção 2.2, de algumas técnicas para representação de um terreno. Em seguida, apresentaremos alguns métodos procedurais para síntese de Terrenos. Na Seção 2.3, abordaremos algumas técnicas ontogenética, em particular, métodos fractais. Na Seção 2.4, discutiremos algumas técnicas de modelagem teleológica, em particular métodos baseados em simulação física. Por fim, na Seção 2.5, discutiremos algumas tendências na modelagem de terrenos.

2.2 Representações de Terrenos

Em 1986, Gavin Miller [7] definiu uma representação para terrenos. Segundo Miller, podemos representar terrenos como um mapa de altura, ou seja, um reticulado bidimensional do qual associa-se, para cada elemento, um valor referente à altura. Essa representação é muito boa, pois, na maior parte dos locais, um terreno pode ser pensado como gráfico de uma função $f : U \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$. Dessa forma, podemos

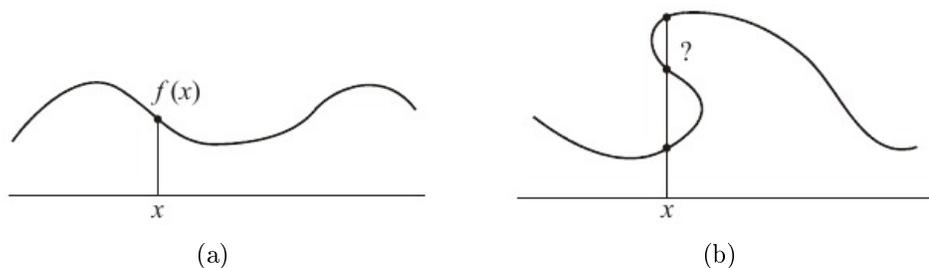


Figura 2.1: Representações de terrenos. (Imagem retirada de Miller, 1986 [7])



Figura 2.2: Terrenos que podem e não podem ser representados por mapa de altura.

representá-lo computacionalmente como uma matriz, da qual cada elemento está associado a altura do terreno em um ponto. Essa representação não suporta certas saliências rochosas, cavernas e encostas verticais. Uma representação simplificada deste problema é ilustrada na Figura 2.1. A curva vista na Figura 2.1a pode ser pensada como o gráfico da função f , e portanto, poderia ser pensada como um mapa de altura. Por outro lado, na Figura 2.1b a curva não é um gráfico de uma função, pois há pontos que seriam associados a mais de uma altura distinta (um ponto com distintas imagens). A Figura 2.2 mostra um exemplo de terreno que pode ser representado por mapa de altura e um relevo com *overhang*, que necessitaria de outra representação.

Uma representação mais genérica para resolver o problema apresentado na Figura 2.1b é utilizar uma parametrização $\phi : I \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^2$ para esta curva. Trivialmente podemos estender este conceito para superfícies, tendo uma parametrização $\phi : U \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$, onde a imagem desta parametrização é o modelo do terreno.

Ao utilizar uma representação paramétrica para um terreno (que não seja um mapa de altura) é necessário garantir que esta satisfaça duas condições: *seja simplesmente conexa e não tenha autointerseção*. Essas condições garantem uma coerência com os modelos de terrenos existentes. Em 2001, Gamito e Musgrave [10] apresentaram uma representação para terrenos, utilizada em métodos procedurais para geração de terrenos com *overhangs*, que satisfaz ambas condições. Este método

consiste em transformar uma superfície $S : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$, onde $S(u, v, t) = M(t) \subset \mathbb{R}^3$ é uma superfície simplesmente conexa para cada instante t . S é chamada de *Conjunto Material*. O processo de advecção do conjunto material, chamado de *Terrain Warping*, é baseado em um campo vetorial $v : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$ contínuo. A continuidade do campo garante que o Conjunto Material satisfará as propriedades desejadas para um terreno, ao longo do processo de advecção. A superfície $S(u, v, 0)$ pode ser gerada como um mapa de altura. A advecção da superfície é um processo local, aplicada a cada ponto da superfície em um determinado instante de tempo. Todo ponto $x(t) = S(u, v, t)$ será transportado pelo campo vetorial e deve ser obtido de acordo com a seguinte equação diferencial:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v(x, t) \\ x(0) = S(u, v, 0) \end{cases} \quad (2.1)$$

Ao longo deste trabalho, adotamos apenas a representação de terrenos por mapa de altura. Essa escolha deve-se ao fato de essa representação ser simples e suficiente para representar um conjunto grande de relevos. A representação de um mapa de altura através de uma matriz é muito conveniente, pois neste caso podemos representar um terreno como uma imagem em escala de cinza, aonde a cor varia de acordo com a altura. Isso possibilita utilizar todo o ferramental existente para operações com imagens em terrenos. Outras representações, também podem ser utilizadas, como por exemplo, uma quadtree. Esta representação pode ser mais compacta, e simples para utilizar em multirresolução.

2.3 Métodos Ontogenéticos

Uma das principais motivações para a área de modelagem de terrenos é gerar modelos realistas. Mas o termo realista é subjetivo. Nesta seção, chamaremos de realistas às formas que sejam perceptualmente semelhantes aos elementos da natureza, ou seja, formas visualmente satisfatórias. Um elemento matemático capaz de criar formas naturais visualmente realista são os fractais. Fractal é uma primitiva muito utilizada

na modelagem de terrenos. Isto deve-se ao fato de serem perceptualmente semelhante a muitas formas naturais. Essas formas são capazes de enganar quem esteja vendo uma imagem da natureza com um olhar displicente. O termo “displicente” refere-se ao fato de uma superfície fractal não possuir as características geomorfológicas que espera-se de tais relevos. Dessa forma, definitivamente, fractais, embora muito úteis em certos casos, não são adequados para modelar todos os tipos de terrenos e em qualquer escala.

As principais aplicações, em modelagem de terrenos, para os fractais, são gerar superfícies semelhantes a montanhas, ou cadeia de montanhas; e adicionar detalhes a uma superfície. Além dos relevos montanhosos, fractais são muito utilizados para modelagem de outros fenômenos naturais, tais como, criação de nuvens, curso de rios ou estradas, definição de fronteiras, etc. Esta primitiva também é utilizada para síntese de textura, em alguns métodos procedurais.

Os processos para construir um objeto fractal possuem uma definição recursiva. Esses métodos são parametrizados de modo que, embora tenham um caráter estocástico, alguns aspectos visuais possam ser controlados. Uma ideia intuitiva, utilizada nas abordagens heurísticas, é que um objeto com geometria fractal é *invariantemente simétrico por escala*. Essa simetria é perceptual, ou seja, o objeto apresenta os mesmos aspectos visuais em qualquer escala. Por isso, este conceito também é conhecido como autossimilaridade. A Figura 2.3 mostra um exemplo de uma curva visualizada em quatro escalas distintas. Em todas as escalas a curva mantém o mesmo caráter estatístico, mudando apenas a amplitude da variação do sinal.

Outra particularidade de um objeto fractal refere-se a sua dimensão. A dimensão de um objeto fractal sempre é maior do que ou igual a sua dimensão topológica. Por exemplo, a dimensão de uma curva fractal é um número real maior do que ou igual a

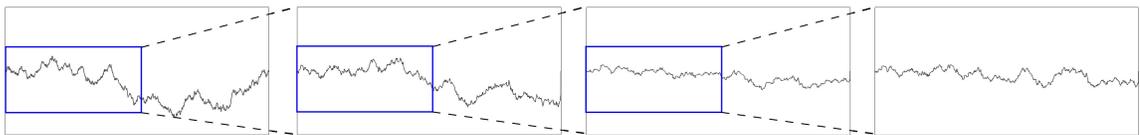


Figura 2.3: Invariância simétrica em Curvas Fractais.

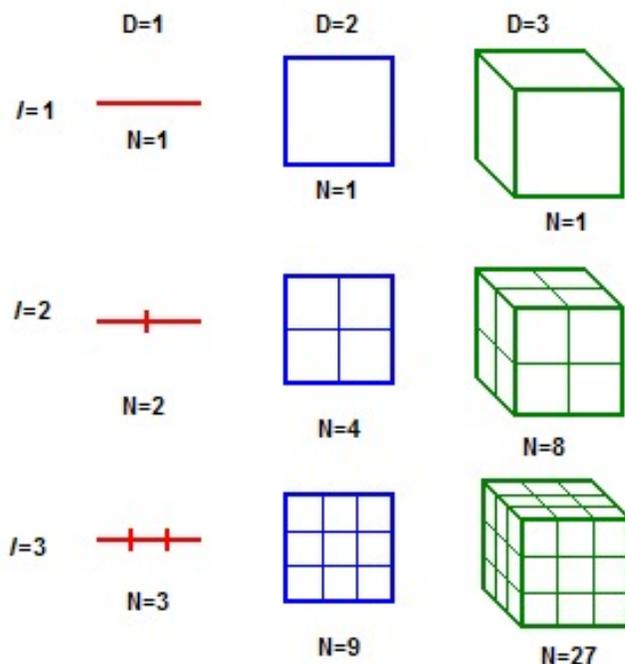


Figura 2.4: Processo de divisão de objetos euclidianos.

um e menor do que dois. A dimensão fractal é uma quantidade estatística referente a uma indicação da tendência de um objeto fractal preencher uma região do espaço de dimensão uma unidade maior do que sua dimensão topológica. Por exemplo, curvas fractais com dimensão próximo de dois tendem a preencher uma região do plano. Existem algumas definições matemáticas mais rigorosas para este conceito, entre as quais podemos citar *Dimensão de Renyi*, *Dimensão de Hausdorff* e *Dimensão de Empacotamento*.

Um processo que permite adquirir uma intuição sobre a dimensão fractal (segundo Hausdorff) é subdividir um objeto sucessivamente e escala-lo para observar sua invariância por escala. Digamos que dividamos um objeto de dimensão topológica D em partes de tamanho $\frac{1}{l}$ do original. Desta forma, a quantidade de partes similares ao objeto inicial é $N = l^D$. Portanto, temos que

$$D = \frac{\log(N)}{\log(l)}$$

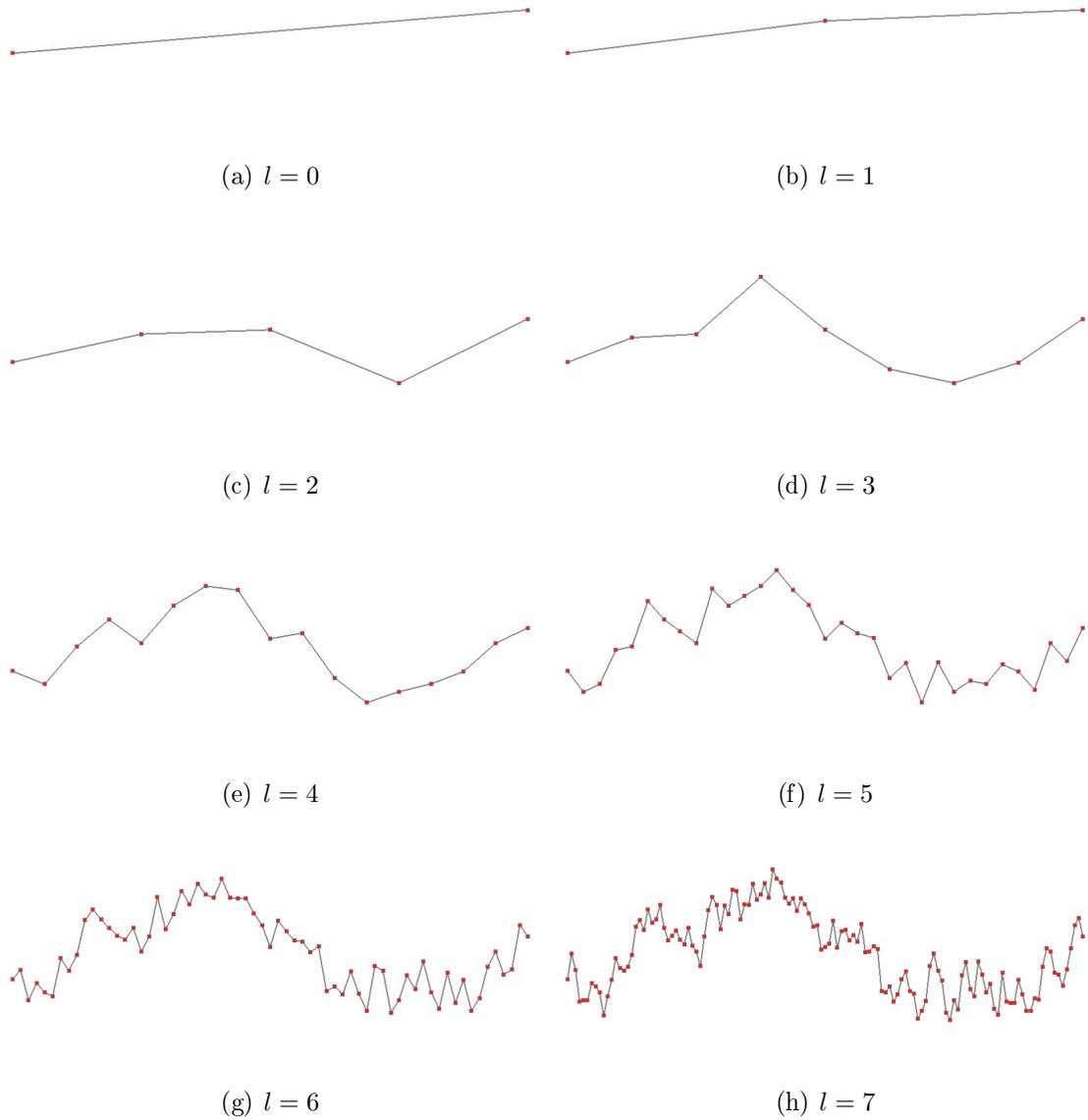


Figura 2.5: Iterações do algoritmo de geração de curvas Fractais por Deslocamento do Ponto Médio.



Figura 2.6: Processo de divisão de uma curva fractal.

Nos exemplos exibidos na Figura 2.4 o processo resulta em objetos similares com a mesma dimensão euclideana.

A Figura 2.6 mostra um exemplo de uma curva fractal, proposta por von Koch, no qual se divide cada segmento em quatro partes similares de tamanho um terço da original. Desta forma, a dimensão fractal desta curva é $D = \frac{\log(4^k)}{\log(3^k)}$, onde k é o passo de subdivisão. Logo, $D = \frac{\log(4)}{\log(3)} \cong 1.26$, portanto uma curva fractal.

A dimensão fractal é responsável por introduzir este comportamento infinitesimal peculiar, ao qual chamamos anteriormente de simetria por escala ou autossimilaridade. Essa característica infinitesimal impede o desenvolvimento de métodos exatos para a criação de fractais. Porém, heurísticas iterativas são capazes de gerar objetos que são visualmente muito semelhantes a fractais. As heurísticas conhecidas para síntese fractal de terrenos podem ser classificadas em cinco categorias: Penalização de Poisson [4, 11], Filtragem de Fourier [4, 12], Deslocamento de Ponto Médio [5, 13], Adições Randômicas Sucessivas [11] e Soma de Ruídos em Banda Limitada [7].

A Figura 2.5 mostra um exemplo de algumas iterações do algoritmo de Deslocamento do Ponto Médio (DPM). Este algoritmo inicia-se com uma curva poligonal e a cada iteração subdivide-se as arestas perturbando o ponto médio.

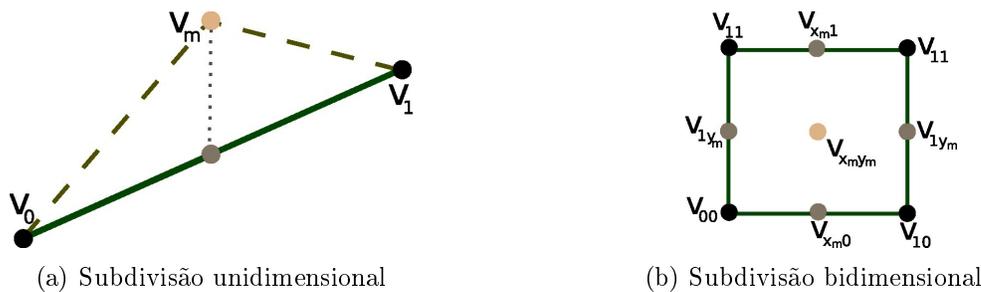


Figura 2.7: Processo de subdivisão no algoritmo DPM.

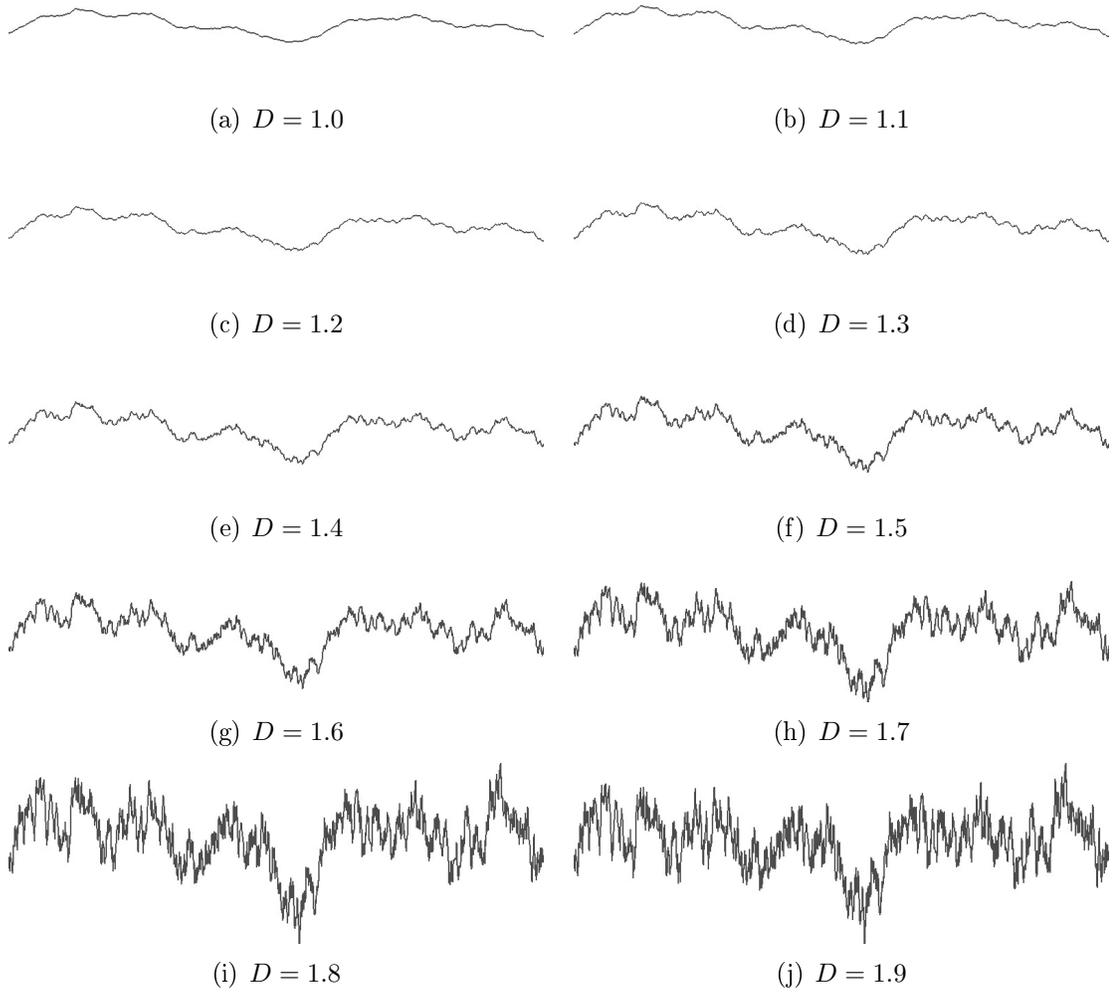


Figura 2.8: Curvas com diferentes dimensões fractais.

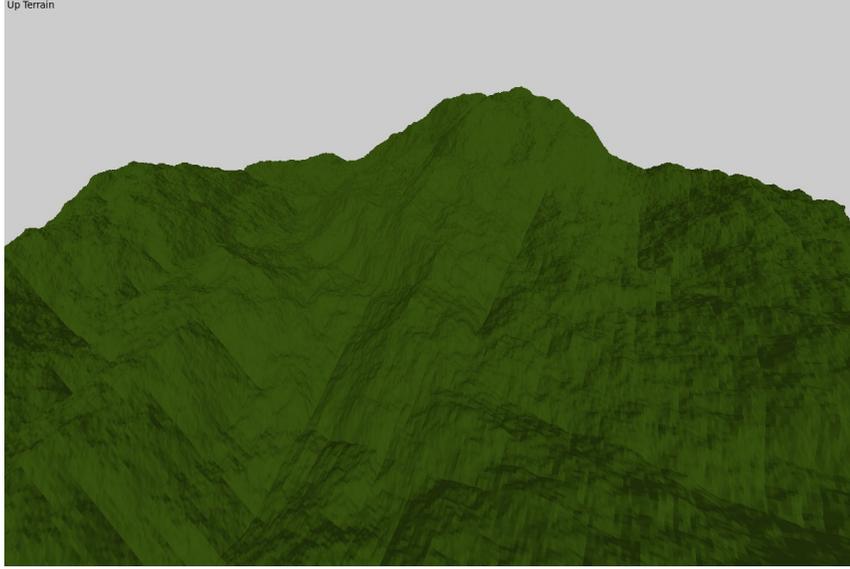


Figura 2.9: Superfície com dimensão fractal.

particular deste algoritmo é quando essa curva é gráfico de uma função. A Figura 2.7a ilustra o processo de subdivisão da aresta, neste caso. Para tal, dados $v_0 = (x_0, y_0)$ e $v_1 = (x_1, y_1)$, a perturbação do ponto médio consiste em acrescentar, a sua ordenada, um valor aleatório (r) ponderado por um valor associado ao nível da iteração (l) e a um fator de escala (s). Este fator de escala está relacionado à dimensão fractal da curva, e deve satisfazer as condições: $0 < s < 1$ e $D_f = D_t + 1 - s$, onde D_f é a dimensão fractal da curva e D_t é a sua dimensão topológica (no caso da curva $D_t = 1$). Por exemplo, seja $v_m = (x_m, y_m)$ o ponto médio desta aresta, temos que:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_m = \frac{x_0 + x_1}{2} \\ y_m = \frac{y_0 + y_1}{2} + \frac{r}{2^{ls}} \end{array} \right.$$

A Figura 2.8, mostra um exemplo com curvas geradas utilizando o mesmo conjunto de valores aleatórios para realizar o deslocamento, alterando apenas a dimensão fractal.

O algoritmo DPM pode ser estendido para gerar superfícies fractais. Podemos alterar o procedimento citado, para gerar superfícies que são gráficos de função. Neste

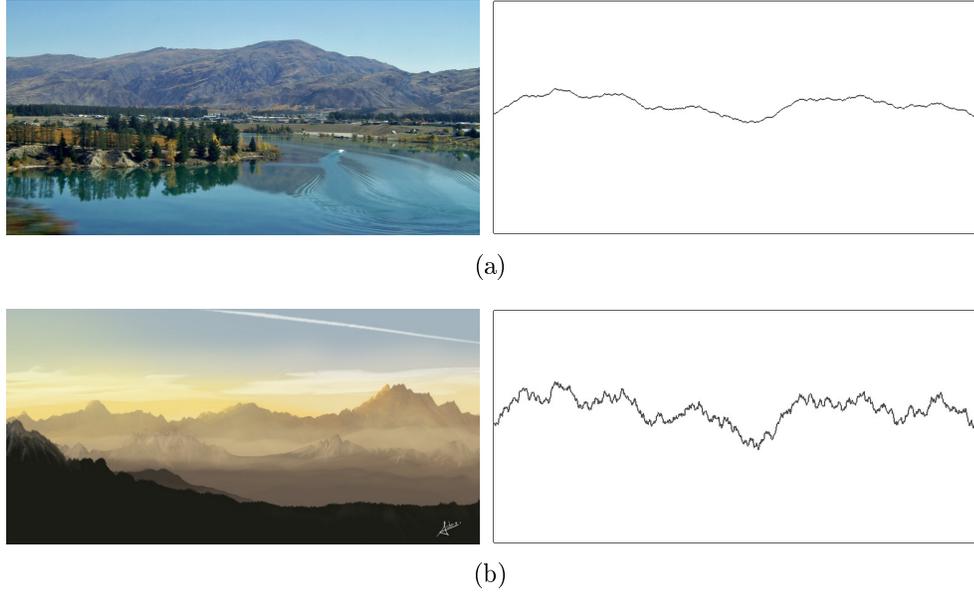


Figura 2.10: Identificação da dimensão fractal de um terreno real

caso, a principal diferença está no processo de subdivisão. A Figura 2.7b ilustra o processo de subdivisão em uma célula da superfície. Agora, dados uma célula com vértices $v_{00} = (x_0, y_0, z_{00})$, $v_{01} = (x_0, y_1, z_{01})$, $v_{10} = (x_1, y_0, z_{10})$ e $v_{11} = (x_1, y_1, z_{11})$, aplicaremos inicialmente uma variação do algoritmo DPM, para o caso unidimensional, em cada aresta. Logo, $v_{x_m0} = (\frac{x_0+x_1}{2}, y_0, \frac{z_{00}+z_{10}}{2} + \frac{r}{2^{ls}})$, $v_{x_m1} = (\frac{x_0+x_1}{2}, y_1, \frac{z_{01}+z_{11}}{2} + \frac{r}{2^{ls}})$, $v_{0y_m} = (x_0, \frac{y_0+y_1}{2}, \frac{z_{00}+z_{01}}{2} + \frac{r}{2^{ls}})$ e $v_{1y_m} = (x_1, \frac{y_0+y_1}{2}, \frac{z_{10}+z_{11}}{2} + \frac{r}{2^{ls}})$. Finalmente, determina-se $v_{x_my_m}$ como uma média dos quatro vértices da célula, perturbando a terceira coordenada. Ou seja, $v_{x_my_m} = (\frac{x_0+x_1}{2}, \frac{y_0+y_1}{2}, \frac{z_{00}+z_{10}+z_{01}+z_{11}}{4} + \frac{r}{2^{ls}})$. A Figura 2.9 mostra um exemplo de uma superfície fractal gerada com este procedimento.

Uma possibilidade interessante no processo de modelagem de terrenos é tentar identificar a dimensão fractal de um relevo real e sintetizar outro modelo de mesma dimensão (e portanto, com as mesmas características estatísticas). A Figura 2.10 mostra um exemplo deste tipo de comparação. Neste caso associamos uma imagem a uma curva cuja dimensão fractal é semelhante a silhueta do relevo. Esta é uma tentativa de “imitar” características geomorfológicas de relevos reais. Na próxima seção, apresentaremos métodos que colocam essa busca como prioridade.

2.4 Métodos Teleológicos

Como já mencionado, a motivação da linha de métodos de modelagem teleológicos é definir técnicas de geração de terrenos que sejam geomorfologicamente coerentes. Um dos primeiros trabalhos desta área foi apresentado, em 1989, por Musgrave [8]. Nesse trabalho o autor apresenta algumas técnicas para síntese de terrenos baseando-se em simulações físicas (principalmente em fenômenos de erosão hidráulica e térmica). Neste trabalho ele apresenta técnicas de geração de superfícies fractais com controle local e independente de frequência, dimensão fractal e outras características estatísticas. Embora trabalhe com superfícies fractais, a técnica apresentada não se baseia em Movimento Browniano Fractal. O método de simulação hidráulica consiste em uma analogia ao processo de “*deixar correr água*” em cada vértice de uma superfície fractal e permitir que partículas escorram formando uma paisagem com erosão e depósito de sedimentos em diferentes locais.

Outro trabalho nesta linha foi apresentado por Hnaidi et al. [14]. Nesse trabalho, os autores mostraram como usar uma equação de difusão no processo de geração de terrenos. Essa abordagem consiste em, a partir de um conjunto de curvas que representam características do relevo como rios, leitos e falésias, utilizar um algoritmo de difusão em um grid para definir o formato da superfície do terreno. Para o processo de síntese é necessário associar, a cada curva de características, elementos como: a respectiva altura do ponto no terreno, o gradiente e os parâmetros de controle de ruído. Desta forma, o método é capaz de difundir essas restrições para o resto do modelo.

Outra abordagem teleológica refere-se a aplicar um método de modelagem sobre um dado topográfico real, de algum terreno existente na Terra. Existem diversas bases de dados que apresentam essas informações. Entre elas podemos citar o *Google Earth*, o projeto *Brasil em Relevo*, da EMBRAPA (com DEM do Brasil), *U.S. Geological Survey* (com DEM dos EUA), entre outros.

Belhadj apresentou um trabalho [15] que, a partir de um modelo de elevação real, sintetiza informações em escalas mais refinadas. Essa síntese é feita utilizando métodos fractais que levam em consideração características geomorfológicas prede-

terminadas. Esse processo é interessante pois, normalmente, a resolução desses dados não é suficiente para apresentar detalhes de mesoestrutura do terreno. Logo, dependendo da aplicação, é necessário determinar tais informações.

Zhou et al. [16] apresentaram um trabalho que gera um modelo de terreno a partir de um exemplar de um DEM real e sketches (que determinam características do terreno, tais como, picos das montanhas e vales). Eles usam o *Algoritmo de Reconhecimento de Perfil e Particionamento de Polígonos* (PPA, do inglês *Profile Recognition and Polygon Breaking Algorithm*) para extrair certas informações geomorfológicas do exemplar. Com essa informação, eles sintetizam um terreno geomorfológicamente parecido com o exemplar e com as características marcadas com o sketch.

2.5 Tendências em Síntese de Terrenos

Apesar dos trabalhos supracitados, as possibilidades que surgem ao utilizar dados reais ainda não foram muito exploradas, no contexto de modelagem de terrenos. Além de serem informações geomorfológicamente corretas, estas são uma fonte de diversos relevos em diversas categorias. Outra vantagem desses dados é que, devido à precisão, é possível representar o terreno em várias escalas. Mais um ponto positivo é que, além da geometria, algumas dessas bases também oferecem informações de textura. Essa informação pode ser útil direta ou indiretamente, ou seja, mapeando a textura obtida no relevo ou obtendo parâmetros/exemplares que possam ser usados em métodos de síntese. Um fato é que trabalhos nesta direção também tem que se preocupar, além da manipulação dos dados, com dificuldades inerentes a manipular grandes bases de dados, como armazenamento, indexação, processamento, etc.

Outra fonte de informações muito pouco explorada, nesse contexto, são as fotografias. Estas também apresentam bastante informações úteis para o processo de modelagem e de síntese de textura. Além disso, algumas fotografias apresentam mais detalhes do terreno do que as base de dados de elevação. Porém, extrair essas informações da imagem ainda é um desafio. Por outro lado, muitas fotografias são georreferenciadas (algumas câmeras possuem GPS, o que possibilita registrar o local

aonde a fotografia foi tirada). Esta informação, pode ser utilizada para saber qual região do planeta aparece na fotografia, e portanto, quais elementos podem aparecer na imagem. Estes dados podem ser bastante úteis para ajudar o processo de extração de informações da imagem.

Explorar essas possibilidades ajuda a resolver uma das grandes dificuldades da modelagem teleológica, que é encontrar uma técnica para modelar classes específicas de relevos. Esses dados fornecem a geometria e alguns atributos visuais de todas as classes de relevos existentes na Terra. Assim é possível utilizá-los diretamente ou para determinar uma classe de instância de parâmetros dos métodos de modelagem para cada classe de relevos.

Uma tendência, que tem sido bastante explorada atualmente, é explorar o potencial do paralelismo, no processo de modelagem e de visualização de terrenos. Este potencial destaca-se pelas possibilidades do uso das placas gráficas nestes processos.

Quanto mais restrições, referente à características topográficas do relevo, o algoritmo esteja sujeito, mais lento serão. Em contrapartida, estes algoritmos têm grandes potenciais para serem paralelizados. Nesta linha Anh et al. [17] e St'ava et al. [18] apresentaram alguns trabalhos que sintetizam terrenos simulando fenômenos de erosão, em GPUs.

Carpentier e et al. [19] apresentaram uma técnica que sintetiza um modelo de terreno, considerando algumas características geomorfológica, auxiliado pelo usuário. Neste trabalho, estão disponíveis algumas ferramentas para determinar formas marcantes no terreno. Os detalhes, são gerados automaticamente utilizando ruídos fractais. Schneider et al. [20] apresentaram uma técnica para editar, sintetizar e renderizar paisagens infinitas utilizando as GPUs.

No processo de Visualização também pode-se utilizar os recursos da placa gráfica. Losasso et al. [21] apresentaram uma técnica para visualizar o terreno em multiresolução. Neste trabalho os autores propõem um método que divide o modelo em regiões com diferentes resoluções, e a malha apresenta uma amostragem regular em cada uma dessas regiões. Nesta linha, Hu et al. [22] apresentaram um trabalho para visualização de objetos (não necessariamente terrenos), cuja malha era subdividida adaptativamente, baseando-se no pondo de vista.

Criar um modelo de terreno muito extenso é um processo inerentemente trabalhoso. Modelar esses terrenos respeitando características geomorfológicas é ainda mais difícil. Conseguir meios para especificar as características desejadas de cada região do terreno de modo intuitivo e simples, mantendo uma geomorfologia adequada é um desafio que ainda motiva pesquisas na área, inclusive é uma das motivações dessa dissertação. Nos próximos capítulos abordaremos alguns tópicos que caminham na direção de ser uma solução para este problema: como especificar de um modo intuitivo grandes extensões de terreno, determinando as características topográficas e geomorfológicas desejadas.

Capítulo 3

Especificação de Terrenos utilizando Traços

Assumiremos neste capítulo que os terrenos serão representados por um DEM. Logo, para cada um dos pontos do domínio deste DEM precisamos definir sua respectiva altura. Neste capítulo, apresentaremos algumas propostas para criar essa função de altura $h : U \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ a partir de um conjunto específico de sketches.

Classificamos os sketches em três categorias: *base*, *silhueta* e *linhas guias*. As duas primeiras referem-se às curvas da base do relevo e à silhueta do relevo (visto por um ponto de vista específico). A terceira são curvas específicas realizadas no chão (plano $z = 0$) para marcar certas características do relevo. Em particular, em alguns trabalhos, as linhas guias são projeções do cume do morro no chão. O cume consiste na curva da silhueta ortogonal ao chão. Neste trabalho, propomos uma forma de especificação que propicia criar relevos com cumes mais genéricas do que curvas contidas em um plano ortogonal ao chão. Desta forma, as linhas guias são mais gerais do que um segmento de reta. Estas podem ser definidas como uma curva plana, ou uma rede de curvas conectadas, contidas no plano do chão. A Figura 3.1 ilustra esta classificação.

Na Seção 3.1, apresentaremos alguns trabalhos que utilizam, prioritariamente, as silhuetas para especificar um relevo. Na Seção 3.2, apresentaremos uma proposta que

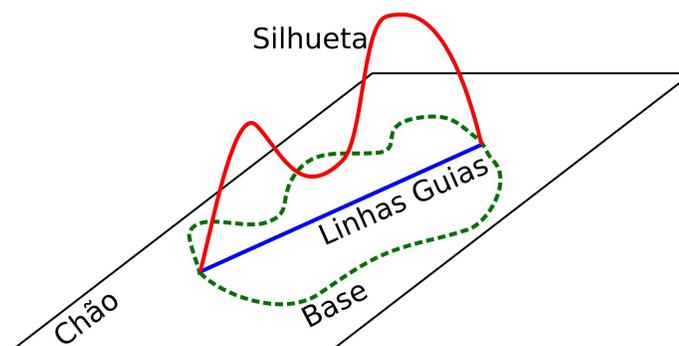


Figura 3.1: Categorias de Sketches.

baseia o processo de especificação nas curvas da base e das linhas guias. Na Seção 3.3, apresentaremos algumas outras classes de traços que possam ser utilizados para especificar os elementos de um terreno.

3.1 Silhuetas

Um dos primeiros trabalhos, que utiliza sketches para criação de relevos, foi o *Harold* [23]. Neste trabalho, foi apresentado uma ferramenta para criação de ambientes virtuais que propicia especificar um relevo e adicionar outros elementos na cena através de billboards. O processo de criação de um relevo inicia-se com o usuário desenhando um sketch referente a silhueta. Ao término do desenho, projeta-se o primeiro e o último ponto do sketch no chão. Em seguida, toma-se o plano ortogonal ao chão que passa pelos pontos projetados. Chamaremos esse plano de *Plano de Projeção*. Os demais pontos do sketch devem ser projetados neste plano. Denotaremos a curva da silhueta por $s : I \rightarrow \mathbb{R}^3$. E a linha guia consiste no segmento que liga a projeção do primeiro ao último ponto do sketch. A Figura 3.2 ilustra esses conceitos.

A abordagem no Harold [23], para calcular a função h , baseia-se em tomar um ponto $p \in U$, uma função Π que projeta p na linha guia (G), a distância entre esses pontos ($d(p) = |p - \Pi(p)|$) e a altura da silhueta sobre o ponto $\Pi(p)$. Dessa forma, uma restrição deste método é que a curva da silhueta seja o gráfico de uma função.

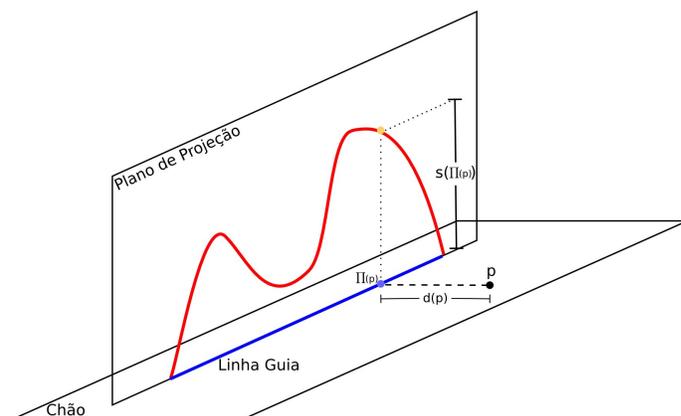


Figura 3.2: Elementos construtivos utilizados no Harold.

Ou seja, podemos definir $s : G \rightarrow \mathbb{R}$. Dessa forma, podemos tomar a função h como: $h(p) = \max \{w(d(p))s(\Pi(p)), 0\}$, onde w é uma função de ponderação. Possivelmente, podemos calcular a altura de um ponto levando em consideração a altura corrente desse ponto, ou seja, $h(p) = f(p, h(p_0))$. Uma possibilidade adotada no Harold é fazer uma combinação linear da altura calculada com a altura corrente, ie, $h(p) = w(d(p))s(\Pi(p)) + (1 - w(d(p)))h_0(p)$, onde $w(d(p)) = \max \left(0, 1 - \left(\frac{d(p)}{5} \right)^2 \right)$. Um problema desta solução é que tomando uma seção ortogonal à linha guia, veremos que o relevo é uma parábola e, em cada seção a distância entre as raízes dessa parábola é 5. Este fato faz com que os relevos tenham largura constante, o que não é natural. A Figura 3.3 um exemplo de um relevo gerado com este procedimento

Em contrapartida ao problema do relevo ter largura constante, Watanabe [24]

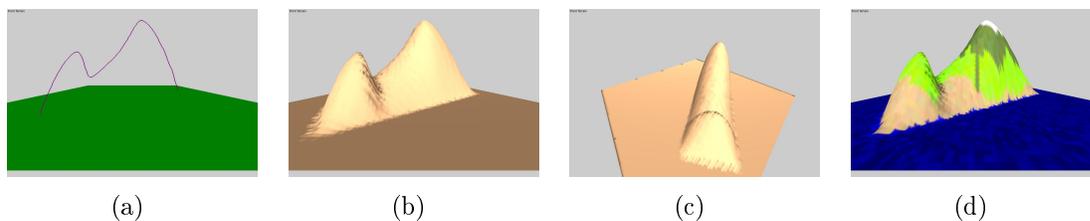


Figura 3.3: Relevos com a função de altura do Harold.

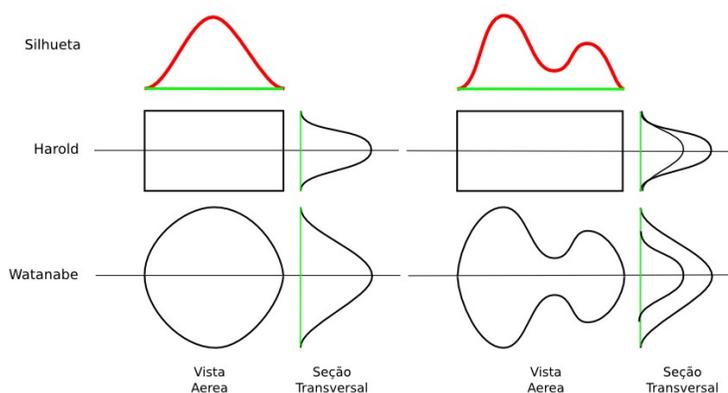


Figura 3.4: Abordagens para construção da curva da base a partir da silhueta. (Imagem retirada de Watanabe et al., 2004 [24])

propôs rotacionar a silhueta até tocar o chão para definir a base. A Figura 3.4 mostra dois exemplos esquemáticos de relevos gerados com essa técnica e compara com o resultado do Harold.

Um trabalho recente, que também constrói um relevo a partir de um sketch da silhueta, é o *Terrain Sketching* [25]. Nele os autores apresentam uma metodologia mais completa do que a apresentada sobre o Harold. Nesse trabalho, além de criar a silhueta, o usuário pode editar essa curva, assim como editar a curva da base (após definir a silhueta é calculado uma base inicial) e a linha guia. Esses novos elementos possibilitam criar relevos mais realistas. A Figura 3.5 mostra um exemplo de como pode-se construir um relevo nesta ferramenta.

No *Terrain Sketching*, analogamente ao Harold, quando o usuário desenha a silhueta, esta deve ser projetada no Plano de Projeção. Em seguida, calcula-se uma curva de base para este terreno. Para calcular esta curva, primeiro toma-se x_l e x_r como o máximo local mais a esquerda e o mais a direita, respectivamente. Calcula-se as distâncias d_l e d_r , como as distâncias do início da linha guia até a projeção de x_l neste e a distância do fim até a projeção de x_r , respectivamente. Em seguida, constrói-se a base com largura $\frac{1}{2}(d_l + d_r)$, e extremos arredondados (semelhante a uma cápsula). Está é uma base inicial que pode ser editada pelo usuário. A Figura 3.6 mostra um

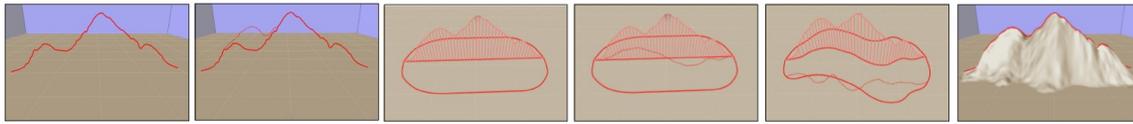


Figura 3.5: Construção do relevo no Terrain Sketching. (Imagem retirada de Gain et al., 2009 [25])

esquema de como calcula-se a base inicial.

Um problema que se tem ao utilizar silhuetas para definir um relevo é definir como projetá-la na cena. A Figura 3.7 mostra um conjunto de silhuetas de morros. Note que parte dessas silhuetas estão oclusas. Essa é uma técnica de desenho semelhante ao modo em que um artista especifica relevos alinhados. Porém, não é trivial como completar estas silhuetas, como alinhá-las e como projetá-las. Este ainda é um desafio da área.

Consideramos a abordagem apresentada no Terrain Sketching suficientemente completa para se especificar um relevo através de sketches. Analisando esses resultados, propomos uma nova abordagem para especificar um relevo. Como a possibilidade de definir bases e linhas guias não triviais, no Terrain Sketching, possibilitou gerar resultados interessantes, experimentamos levar mais adiante a utilização destes elementos para especificar um relevo. Na próxima seção apresentaremos essa abordagem proposta.

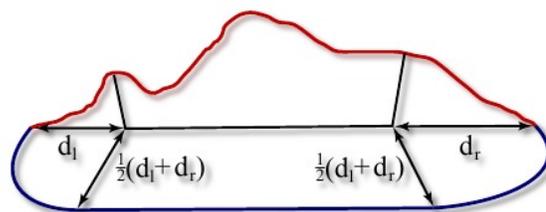


Figura 3.6: Construção inicial da base no Terrain Sketching. (Imagem retirada de Gain et al., 2009 [25])

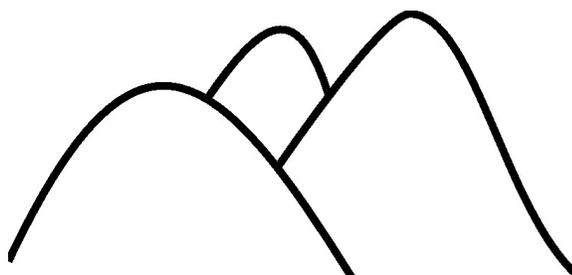


Figura 3.7: Construção do relevo usando múltiplas silhuetas.

3.2 Bases e Linhas Guias

Nesta seção, discutiremos como gerar relevos a partir de sketches da base e de linhas guias. Os métodos apresentados podem ser utilizados na geração de relevos genéricos. Porém, destacaremos como gerar algumas categorias específicas, tais como morros, planaltos e vulcões.

Nos procedimentos citados até o momento, o domínio da função de altura h era genérico ($U \subset \mathbb{R}^2$). Porém, destacávamos que esta função era nula nos pontos fora da região delimitada pela base. A partir de agora consideraremos o domínio de h como sendo essa região (Ω). Além disso, utilizaremos uma noção mais geral para as linhas guias (G). Essas podem ser qualquer conjunto de pontos (vazio, discreto e contínuo) em Ω , utilizado para determinar algumas características do relevo (como cumes, vales, falésias, etc.). A Figura 3.8 ilustra esses conceitos.

Um método simples para gerar um morro, a partir da análise da curva da base (B), é construir uma função h , aplicada aos pontos $p \in \Omega$, baseando-se na distância de p até sua projeção em B . Projetar p em B significa obter $q \in B$ tal que $|p - q| \leq |p - r|, \forall r \in B$. A projeção não é uma função bem definida, pois podem existir mais de um ponto de B que satisfaz tal restrição. Em particular, a projeção dos pontos $p \in EM(B)$ (Eixo medial de B) em B é realizada em mais de um ponto de B . Isso decorre diretamente da definição de eixo medial, como o conjunto dos centros das bolas que tocam uma curva fechada em mais de um ponto e não contém nenhum ponto desta curva em seu interior (estamos restringindo a definição para curvas, embora a definição seja equivalente para qualquer superfície fechada).

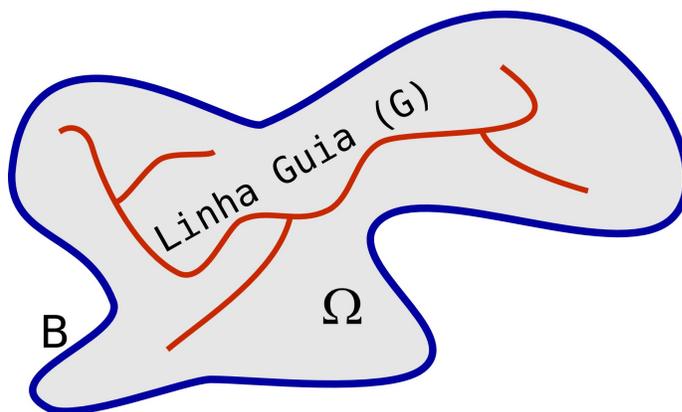


Figura 3.8: Base e Linha Guia.

Considerando a função $h : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ tal que $h(p) = \inf_{q \in B} |p - q|$, podemos assumir as seguintes propriedades:

A função h está bem definida e é contínua.

Dados $p, q \in \Omega$, tomemos $r, s \in B$, tais que $h(p) = |p - r|$ e $h(q) = |q - s|$. Pela desigualdade triangular, temos que $h(p) = |p - r| \leq |p - q| + |q - r|$. Pela definição de h , temos que $h(q) = |q - s| \leq |q - r|$. Logo $h(p) - h(q) \leq |p - q|$. Analogamente $h(q) - h(p) \leq |p - q|$, e portanto $|h(q) - h(p)| \leq |p - q|$. Logo, h é lipschitziana, e portanto uniformemente contínua. Por razão maior, h é contínua, como queríamos demonstrar.

A função h vale zero nos pontos da base e assume seu valor máximo sobre o eixo medial.

Isso decorre diretamente da definição da função e de um ponto pertencer ao eixo medial.

A Figura 3.9 mostra o exemplo de um terreno gerado a partir da curva da base. A Figura 3.9a mostra, em vermelho, o sketch da base; a Figura 3.9b mostra o relevo representado por uma imagem em escala de cinza (aonde branco é o ponto mais alto e preto o ponto mais baixo); e as Figuras 3.9c e 3.9d mostram duas visões desse relevo.

Podemos compor a função h com uma função contínua $w : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ de ponderação, a qual chamaremos de *Função de Perfil*. Neste caso, $w \circ h$ ainda é uma

função contínua. Podemos usar essas funções para gerar morros com características distintas. A Figura 3.10 mostra alguns exemplos de relevos gerados com diferentes funções de perfil

Além de controlar certas características geomorfológicas do terreno, ainda podemos variar a função de perfil para obter classes distintas de relevos.

Podemos tomar função de perfil w , contínua e crescente até um determinado valor de h_p e decrescente, a partir desse ponto. Por exemplo, dados $\lambda, \alpha, \beta > 0$, podemos tomar w como:

$$w(h_p) = \begin{cases} \beta h_p, & \forall h_p \in [0, \lambda] \\ -\alpha h_p + (\alpha + 1) \lambda, & \forall h_p > \lambda \end{cases}$$

Neste caso a superfície da imagem de $w \circ h$ tem um formato semelhante a um vulcão. Podemos variar os valores de α , β e λ convenientemente para variar algumas características desse vulcão. Por exemplo aumentando β teremos um vulcão mais íngreme. Aumentando λ teremos a boca do vulcão mais alta, e portanto mais estreita. E aumentando α teremos a cratera mais íngreme (e portanto mais funda). A Figura 3.11a mostra um exemplo de vulcão gerado para $\alpha = 1$, $\beta = 2$ e $\lambda = 4$.

Outra classe de terrenos que pode ser gerado utilizando uma classe de função w são os planaltos. Planaltos são elevações geológicas, que devido a erosão tem seu cume achatado. Faremos uma simplificação, considerando esse cume está contido no plano $z = \lambda$ (para um λ dado). Para criar nosso mapa de altura precisamos tomar uma função w contínua, crescente até um determinado valor de h_p e constante a

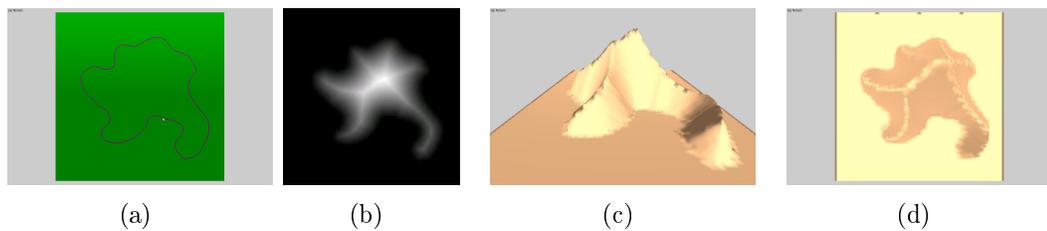


Figura 3.9: Relevo gerado com função $h(p) = \inf_{q \in B} |p - q|$.

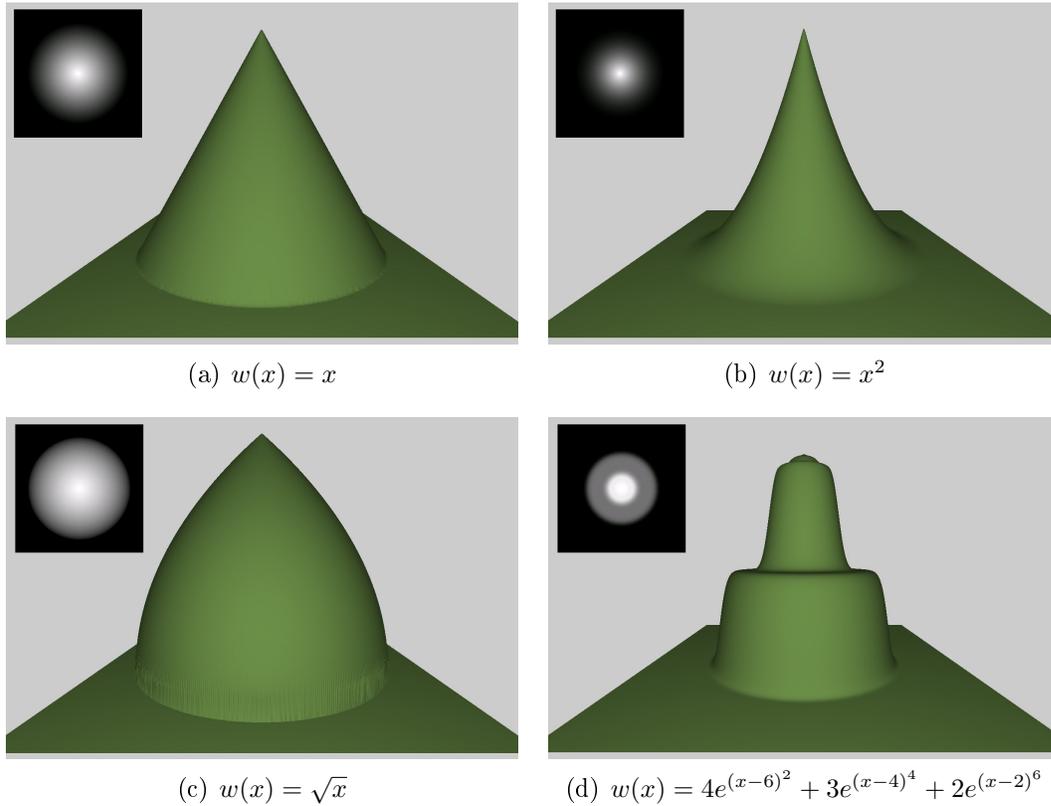


Figura 3.10: Relevos com diferentes funções de perfil.

partir deste. Por exemplo, dados $\lambda, \beta > 0$, podemos tomar w como:

$$w(h_p) = \begin{cases} \beta h_p, & \forall h_p \in [0, \lambda] \\ \beta \lambda, & \forall h_p > \lambda \end{cases}$$

Neste caso, quanto maior λ mais alto o cume, e quanto maior o β mais ingrime a encosta. A Figura 3.11b mostra um exemplo de vulcão gerado para $\beta = 3$ e $\lambda = 1.5$.

Note que a componente de w referente a encosta é uma função linear. Podemos utilizar outros tipos de funções para obter propriedades mais interessantes. Por exemplo, podemos tomar

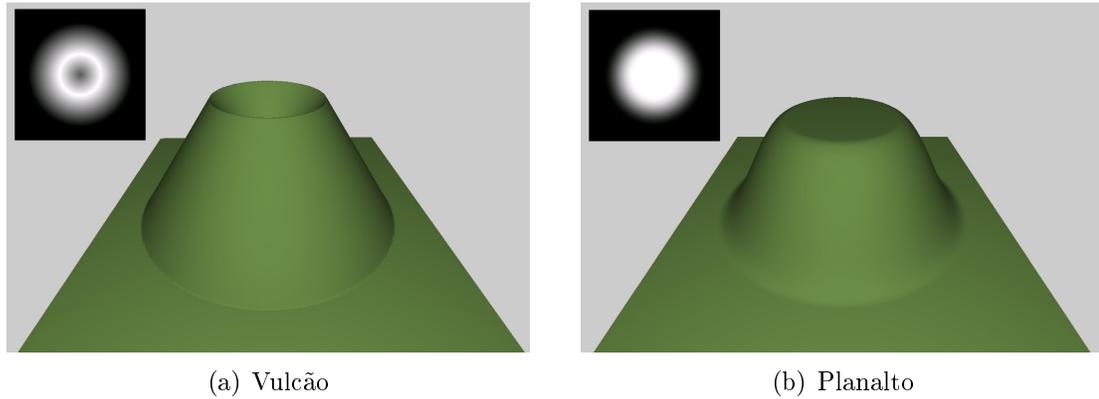


Figura 3.11: Exemplos de Relevos gerados com variações da Funções de Perfil.

$$w(h_p) = \begin{cases} \beta(3 - 2\frac{h_p}{\lambda}) * (\frac{h_p}{\lambda})^2, & \forall h_p \in [0, \lambda] \\ \beta h_p, & \forall h_p > \lambda \end{cases}$$

Essa função, além de contínua, é suave próximo do cume ($h_p = \lambda$) e da base ($h_p = 0$). Esta característica acrescenta um realismo ao relevo, pois assemelha-se ao processo de acumulação dos sedimentos, devido a erosão. A Figura 3.12 mostra planaltos com encosta linear e suave.

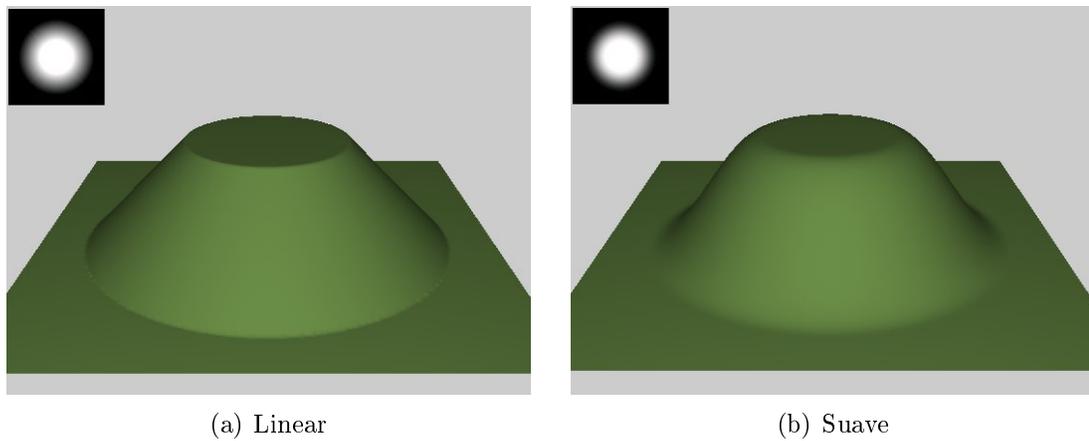


Figura 3.12: Encostas.

Essas técnicas de geração de relevos, a partir da curva da base, geram modelos com características visuais satisfatórias. Porém, o usuário não tem muito controle sobre o formato de um relevo. Por exemplo, em um morro os cumes serão em pontos sobre o eixo medial, aonde a função distância assume seu máximo. Outro exemplo é que a base superior do planalto, assim como a boca de um vulcão, são definidas de acordo com a escolha de parâmetros da função de peso w .

Neste caso, não consideramos nenhuma informação sobre a linha guia. A linha guia é formada por pontos característicos, especificados pelo usuário, que semanticamente carrega informações como cumes, vales, bases superiores, etc. A seguir, apresentaremos algumas técnicas para especificar a função de altura, baseando-se, além da base, nas linhas guias. Essa possibilidade oferece mais controle ao artista, que pode determinar algumas características dos relevos. Esses métodos estão divididos em dois casos. No primeiro, a linha guia é um conjunto discretos de pontos, que representam topos e bacias. No segundo, ela é uma curva contínua, que pode representar cumes, vales, bases superiores, bocas de vulcões, etc. A Figura 3.13 exemplifica os três casos.

Quando G é discreto, digamos que $G = \{g_1, \dots, g_n\}$, seja $\mathcal{H}_0 = 0$, altura do relevo sobre a base, e $\mathcal{H}_1, \dots, \mathcal{H}_n$, as alturas especificadas para os pontos sobre a linha guia. Além disso, tomemos as distâncias de p até sua projeção na base ($d_0 = \min_{q \in B} |p - q|$) e até os pontos da linha guia ($d_1 = |p - g_1|$, $d_2 = |p - g_2|, \dots, d_n = |p - g_n|$), respectivamente. Assim, definiremos h como:

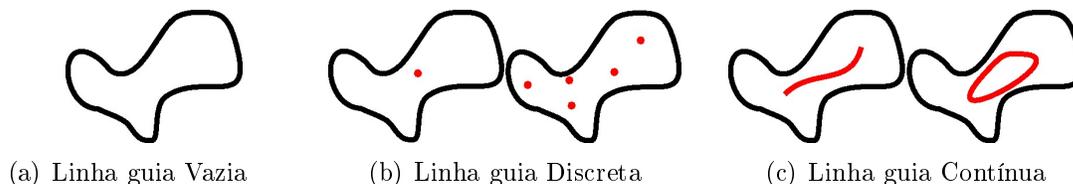


Figura 3.13: Função de altura baseada na base e na linha guia.

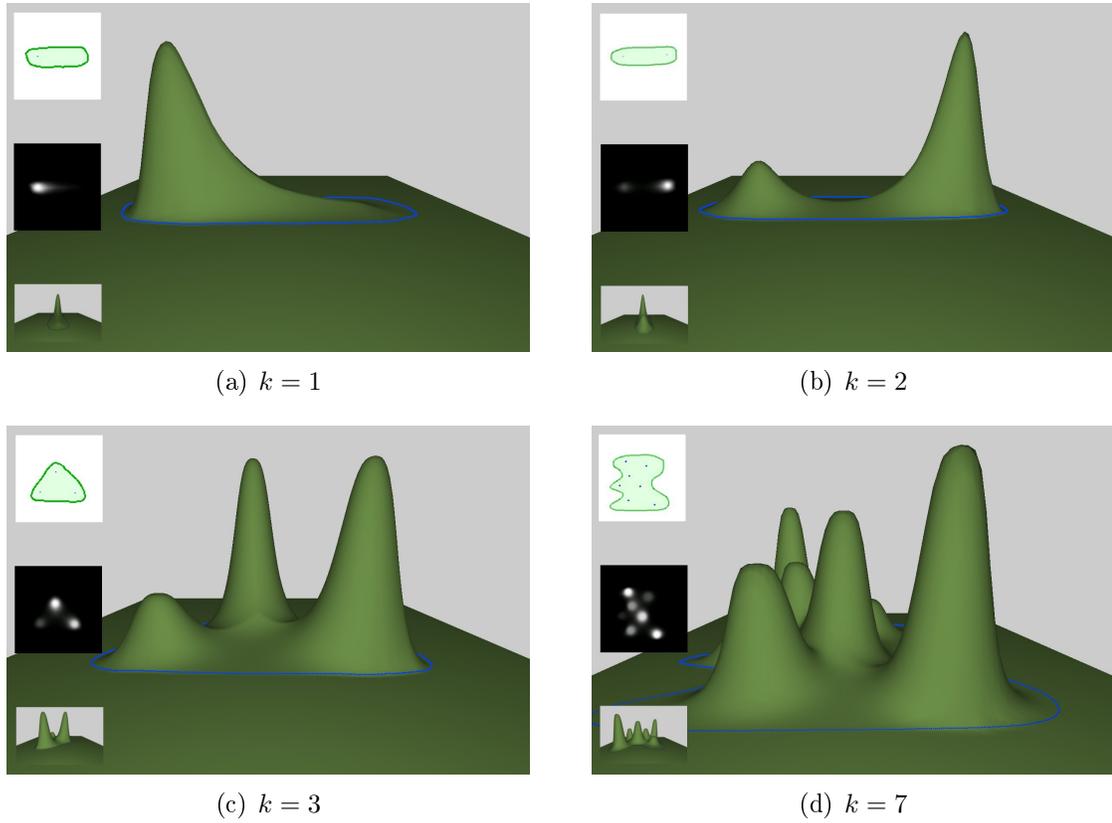


Figura 3.14: Linha guia discreta (Função de Perfil $w(h_p) = h_p^k$, onde $k = \#G$).

$$h(p) = \frac{\sum_{i=0}^n \left(\prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n d_j \right) \left(\sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n d_j \right) \mathcal{H}_i}{\sum_{i=0}^n \left(\prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n d_j \right) \left(\sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n d_j \right)} \quad (3.1)$$

A função h é contínua, pois, por construção, é uma interpolação multilinear. Vale zero nas bases e possui cumes no interior de Ω com altura predeterminada. Novamente pode-se usar uma função de perfil para agregar certos comportamentos ao relevo. Um exemplo é $w(h_p) = h_p^k$, onde k é a quantidade de pontos da linha guia. A Figura 3.14 mostra alguns exemplos de relevos gerados usando linha guia discreta, ponderada por tal função de perfil.

Quando G é contínuo, podemos dividir este caso em outros dois sub-casos: quando G é uma curva aberta, ou uma rede de curvas abertas conectadas, e quando é uma curva fechada.

No caso de G ser uma curva aberta, pode-se interpretá-la como cumes ou vales. Um caso particular desta classe de curva é o eixo medial. Uma proposta para a função h nesse contexto é:

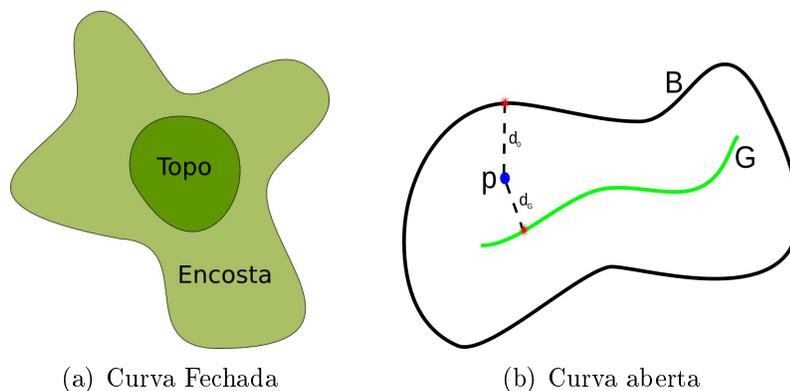


Figura 3.15: Caso de Linha Guia contínua.

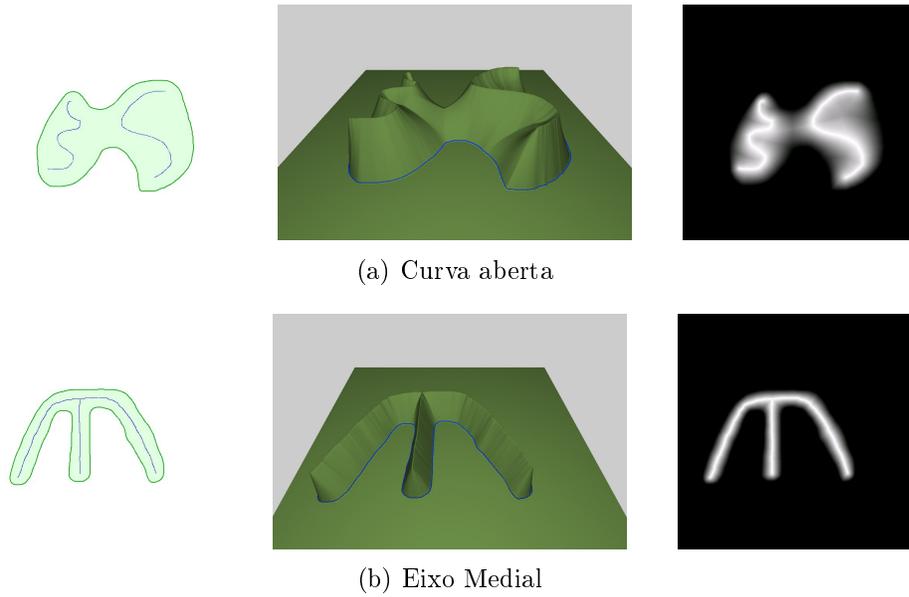


Figura 3.16: Relevos gerados com linha guia contínua.

$$h(p) = \frac{d_0 \mathcal{H}_s}{d_0 + d_g} \quad (3.2)$$

onde d_0 é a distância de p até a base, d_g é a distância até a linha guia e \mathcal{H}_s é a altura do relevo sobre a linha guia. Neste caso, a função h é uma interpolação linear da altura do relevo sobre a linha guia e a altura sobre a base (que é zero). Vale observar que novamente a função de projeção pode não estar bem definida. Desta forma, não podemos variar a altura sobre a linha guia. A Figura 3.16 mostra dois exemplos de relevos e seus sketches geradores.

No caso em que G é uma curva fechada, esta curva divide Ω em duas regiões bem definidas, das quais chamaremos uma de *encosta* e outra de *topo*. A Figura 3.15a elucida esta divisão.

Desta forma, podemos usar diferentes funções de perfil para modelar a encosta e o morro. Como uma propriedade necessária é a continuidade, é necessário estar atento para que a “junção” destas funções seja contínua. A Figura 3.17 mostra dois exemplos de relevos gerados utilizando esta técnica.

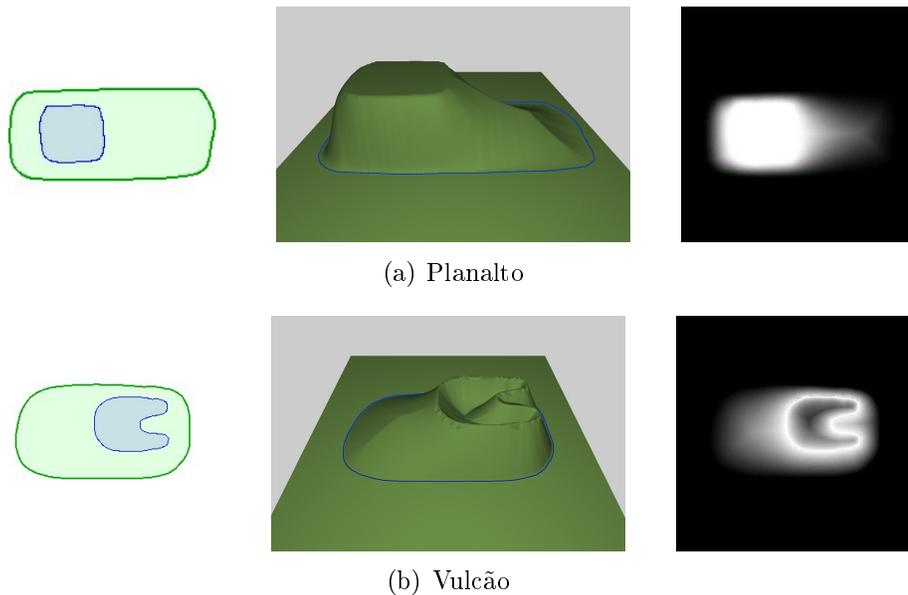


Figura 3.17: Relevos cuja linha guia são curvas contínuas e fechadas.

Além da aplicação na geração de certos relevos, a técnica utilizada nesse terceiro caso pode ser utilizada para gerar um relevo a partir de um conjunto de curvas de nível. Isso é interessante, pois essa é a representação de terrenos utilizada por topógrafos. Neste caso pode ser necessário utilizar múltiplas linhas guias fechadas e encaixadas. Ainda assim, a extensão deste método é trivial.

Essas funções de altura e as funções de perfil propostas foram elaboradas para gerar relevos com certas propriedades. Esse conjunto de funções pode ser estendido para satisfazer outras propriedades. Seixas et al. apresentaram duas propostas para gerar relevos a partir de curvas de níveis (que pode ser adaptado conforme supracitado). No primeiro [26] eles propuseram gerar relevos usando morfologia matemática. Já no segundo [27], eles utilizaram a equação de difusão do calor.

No processo de construção do terreno temos que avaliar todos os pontos do DEM e determinar sua altura, utilizando as funções de altura de cada relevo. Um passo importante para esse procedimento é determinar se um ponto no domínio do DEM está no domínio da função de altura. Digamos que DEM tenha m amostras, sendo

que destas m' amostras estão em Ω . Uma primeira estratégia seria utilizar métodos de geometria computacional que testam a pertinência de um ponto no interior de um polígono P com n vértices. Testes ingênuos tem complexidade $O(n)$, para cada ponto avaliado. Desta forma, apenas o teste de pertinência teria complexidade $O(mn)$. A estratégia que adotamos consiste em gerar uma imagem do polígono P com o interior preenchido. Existem métodos que realizam essa operação em tempo $O(n \log(n))$. Com essa imagem, o teste de pertinência é $O(1)$ (basta verificar a cor do pixel respectivo ao ponto na imagem). Portanto, a complexidade de testar a pertinência dos pontos em Ω tem complexidade $O(n \log(n) + m)$.

3.3 Outros Traços

Assim como exploramos a utilização da base e das linhas guias, abrindo mão das silhuetas, vislumbramos que podemos obter bons resultados, mesmo abrindo mão da base, usando apenas linhas guias e *pseudo-silhuetas*. Estamos chamando de pseudo-silhueta a curva sobre a superfície do terreno gerada por um corte seccional. Ou seja, estamos propondo especificar a linha guia, planos ortogonais a esta curva e as pseudo-silhuetas, sobre estes planos. A partir destes dados, é possível definir uma função de altura através de uma interpolação das alturas das projeções do ponto nas pseudo-silhueta vizinhas.

Podemos novamente utilizar a interpolação da altura da pseudo-silhueta sobre a projeção de cada ponto (nas duas pseudo-silhueta vizinhas) ponderadas pelas respectivas distâncias. Uma vantagem, neste caso é que como o suporte da pseudo-silhueta na linha guia é um segmento de reta, podemos definir uma função que associa cada ponto a sua projeção (a projeção sobre um segmento de reta existe e é única).

As abordagens para especificação de relevos apresentadas nesse capítulo, até o momento, referem-se às duas possíveis visões de um relevo. A primeira visão, utilizada para especificar um morro através de sua silhueta, é frontal, ou seja, análoga a visualizar a lateral de um relevo. A segunda abordagem utiliza o ponto de vista superior, ou uma visão aérea, não muito comum nos trabalhos de modelagem de terrenos utilizando sketches. Nessa visão, é possível observar aspectos como a base

do relevo, assim como cumes, vales e rios. A abordagem, para especificar relevos através das linhas guias e pseudo-silhuetas, utiliza ambos esquemas de visão. Para determinar a linha guia e os planos seccionais, a visão utilizada é a superior; e para especificar as pseudo-silhuetas, a visão é frontal.

É possível argumentar contra a abordagem de especificar um relevo utilizando uma vista superior, dizendo que não é muito natural, haja visto que um ser humano representa um morro mentalmente através da sua silhueta. Em outras palavras, a silhueta é a característica mais marcante de um relevo, para um ser humano, pois é a característica que normalmente é vista (normalmente vemos um relevo lateralmente, em vez de uma visão aérea). Ainda assim, acreditamos que com pouco treinamento um artista já conseguirá desenvolver a habilidade de modelar um relevo de acordo com as características desejadas, utilizando este ponto de vista. Outro ponto muito importante é que com poucos traços, e sem necessitar muita edição, é possível construir relevos com geometria razoavelmente complexa e semelhante a formas naturais.

Além disso, essa visão aérea assemelha-se ao modo que um topógrafo representa um terreno. Normalmente estes utilizam curvas de níveis e outras curvas, que representem características específicas, vistas superiormente, como rios, divisões geográficas, estradas, etc. Essas curvas podem ser representadas com as classes de curvas propostas neste capítulo. E a partir destes dados construir um modelo equivalente.

Outro ponto favorável a essa técnica é que o artista terá controle de características

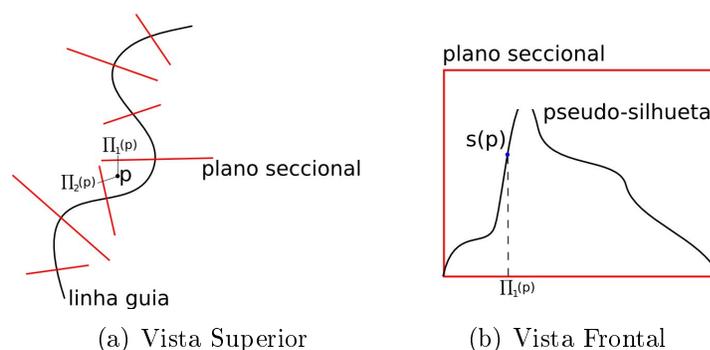


Figura 3.18: Geração de Relevos por Linhas guias e Pseudo-Silhueta.

marcantes, como cumes e vales, com poucos traços. A principal característica desta abordagem é: com poucos traços é possível especificar a macroestrutura de um relevo coerente com a geomorfologia esperada.

Para obter um modelo realista é necessário determinar os detalhes geométricos do terreno. Os métodos de modelagem propostos nesta seção definem, prioritariamente, a macroestrutura do relevo. Para refinar a mesoestrutura pode-se utilizar métodos procedurais. Em outras palavras, nosso método define bem a forma em uma escala baixa. Para obter mais detalhes, ou seja, informações em uma frequência mais alta, pode-se usar alguma técnica procedural baseada em ruídos, aplicar alguma simulação física tomando nosso resultado como passo inicial, ou extrair altas frequências de terrenos reais e adicioná-las ao modelo.

Métodos procedurais para modelagem de terrenos são parametrizados, determinando de certas características da superfície resultante. Esse controle muitas vezes não é intuitivo. Uma possibilidade é parametrizar esses métodos a partir de informações obtidas de sketches. Hnaidi et al. [14] apresentaram um trabalho que utiliza esse recurso para caracterizar um relevo. Outro trabalho que utiliza sketches para, além de criar a macroestrutura do relevo, parametrizar uma função para adicionar detalhes foi apresentado por Gain et al. [25].

Acreditamos que podemos utilizar essa ideia para parametrizar terrenos extensos. Com os sketches, podemos segmentar o terreno em regiões que serão parametrizadas individualmente, possibilitando criar um relevo com características topográficas distintas, de região para região. Ou seja, inicialmente pode-se criar um continente, diferenciando o que é terra e o que é água. Em seguida, divide-se esse continente em biomas. Em cada bioma parametriza-se os métodos de síntese de terrenos, especificando as características topográficas desejadas. Além disso, em cada bioma define-se com sketches marcas como bases de relevos e linhas guias, cursos de rios, cânions, etc. Dessa forma, é possível construir terrenos de grandes extensões assegurando-se que as principais características serão conservadas.

Dessa forma é possível classificar os sketches, assim como na natureza, nas seguintes camadas: continentes, biomas, relevos, detalhes. Segundo essa divisão podemos definir sketches de continentes como as curvas fechadas que demarcam regiões de

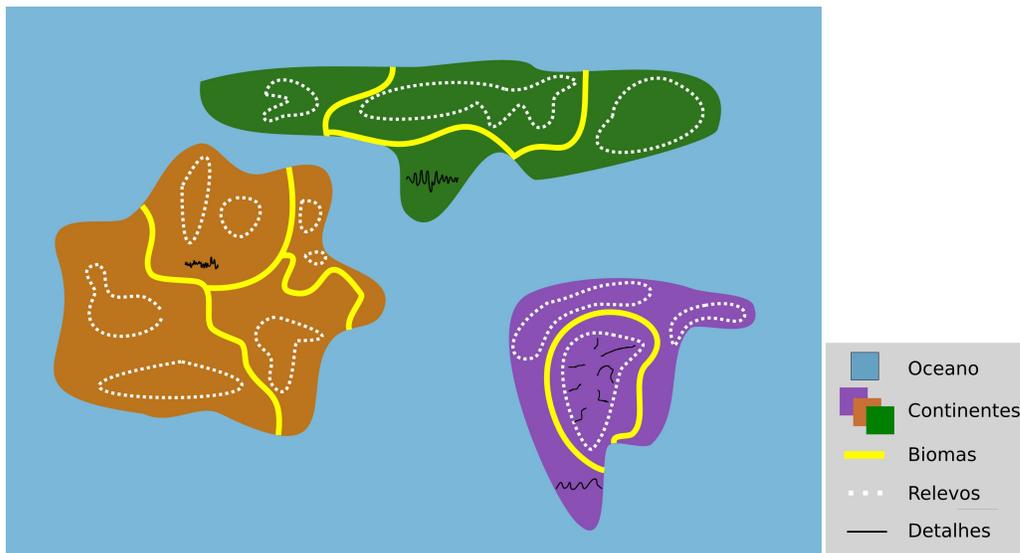


Figura 3.19: Níveis de Sketches.

terra (que não são oceanos). Os biomas são divisões desses continentes. A partir desta divisão é possível determinar alguns aspectos particulares sobre cada região. Podemos citar exemplos desses aspectos como parâmetros de métodos procedurais para modelagem de terrenos e síntese de texturas. Além disso, podemos fixar características gerais de certos relevos. Por exemplo, todos os relevos de um bioma terão uma função de perfil fixada (isso é coerente com o que ocorre na natureza, pois o perfil de um relevo está relacionado aos materiais presentes no solo e ao processo de formação, constante em um bioma, ou em parte dele). Além desses, pode-se utilizar os sketches para especificação de relevos apresentados anteriormente. Por fim, os sketches de detalhes. Esses traços podem conter informações para parametrizar métodos procedurais, para adicionar detalhes ao relevo. Outra possibilidade, é utilizar esses traços para inferir características geomorfológicas em um relevo (como falésias, por exemplo).

A Figura 3.19 mostra um exemplo de como esses sketches podem ser agrupados. Note que essa abordagem pode ser interpretada como camadas de especificação, aonde cada camada inferior agrega novas informações a camada superior. Outra

forma de pensar é que cada sketch apresenta a informação em uma resolução distinta (continente apresenta informação para a resolução mais grosseira, que é refinada nas camadas intermediárias até a mais fina que é a de detalhe). Essa abordagem pode ser interessante, pois há informações que só são vistas em certas resoluções. Dito em outras palavras, há dados que são específicos de uma resolução. A Figura 4.8 mostra um exemplo aonde isso ocorre. Além da geometria, em um modelo de um planeta, a textura pode ser representada em multirresolução. Neste caso, o processo de especificação das informações referentes a textura podem ser explicados a cada camada.

Ao longo deste capítulo nós abordamos o processo de especificação de elementos topográficos de uma paisagem. Este é um processo incremental (a cada momento o usuário adiciona uma nova informação ao modelo). Dentro do que foi apresentado, não há restrições referente à edição dos dados. Ou seja, após especificado os sketches de um terreno o usuário pode editar as respectivas curvas a fim de acertar a topografia.

Além da edição dos sketches, pode ser interessante realizar macro edições, ou seja, manipular um conjunto relevos. Esse problema não foi abordado, mas apresenta alguns desafios interessantes. O primeiro e mais simples, é definir as possíveis transformações (acreditamos que as transformações afins sejam suficientes para tal). Outra operação possível é como juntar dois relevos. Ou seja, como fazer um *blending* entre os modelos, que seja geomorfologicamente coerente. Durante uma transformação rígida, pode-se elevar a base de um relevo (para manter a coerência com um terreno mais alto). Isto, porém, pode gerar descontinuidades as quais deverão ser corrigidas. Outro problema é como selecionar partes do terreno para serem editadas. Essa seleção pode ser direta, feita através de um sketch que determina exatamente qual região será editada. Outra forma é, indiretamente, através de algum modo para marcar o terreno, determinar quais partes dos relevos serão editadas. Esse problema não possui solução única, portanto é necessário estudar quais as melhores formas para se fazer esta seleção. Outro problema é como, ao mover parte de um relevo, determinar como será preenchido o espaço deixado. Citamos algumas edições referentes a geometria. Mas ainda há os relativos aos aspectos visuais. É necessário definir como

estes dados serão modificados, a partir das edições geométricas. Esses são alguns tópicos que precisam ser trabalhados ao realizar uma edição em um terreno.

No próximo capítulo será apresentado como os relevos modelados podem ser visualizados. Em seguida o Capítulo 5 apresentará como as técnicas abordadas foram implementadas nas aplicações desenvolvidas nesta pesquisa.

Capítulo 4

Visualização de Terrenos

4.1 Elementos do Terreno

A Natureza é visualmente muito complexa. Desde o globo terrestre, até um pequeno grão de areia, podemos listar elementos naturais em diferentes escalas. Existem algumas áreas da ciência responsáveis por estudar esses diversos elementos existentes. Podemos citar alguns exemplos como: topografia, geomorfologia, biologia, geografia, geologia, etc. Essa diversidade se explica pois, além dos elementos e fenômenos vistos na superfície da Terra, ainda têm aqueles no interior do planeta, nas águas e no ar. Segundo a categorização desses elementos, podemos dividir a Terra em quatro partes:

- Litosfera – a parte sólida formada a partir das rochas (crosta terrestre);
- Hidrosfera – conjunto total de água do planeta (seus rios, lagos, oceanos);
- Atmosfera – a camada de ar que envolve o planeta;
- Biosfera – as regiões habitadas do planeta.

A *Biosfera* é o conjunto de todos os ecossistemas do nosso planeta. Este é um conceito proveniente da Ecologia e está relacionado com os conceitos de litosfera, hidrosfera e atmosfera. Incluem-se na biosfera todos os organismos vivos que vivem no planeta, embora o conceito seja geralmente alargado para incluir também os seus

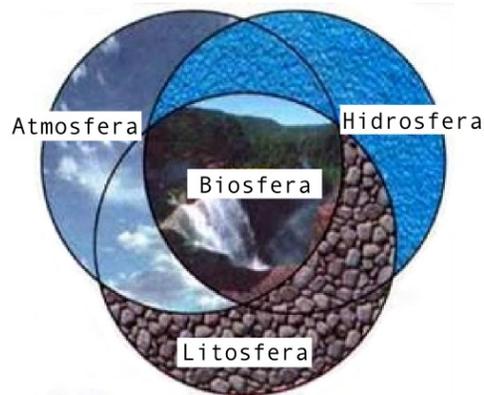


Figura 4.1: Biosfera.

habitats. A biosfera inclui todos os ecossistemas que estão presentes desde os topos das montanhas mais altas até as regiões mais profundas do oceano. Nesses diferentes locais, as condições ambientais também variam.

Há muitas pesquisas e aplicações interessadas em modelar o fundo do mar, fenômenos na atmosfera ou no interior do planeta (como por exemplo camadas de solos, rochas, e outros minerais da crosta terrestre). Para essas aplicações o DEM não é uma boa representação para o terreno. Modelos como o proposto por Benes e Forsback [9], uma composição entre representação por mapa de altura e voxels, são mais adequadas. Porém, o interesse dessa pesquisa consiste em representar as paisagens visíveis, presente na biosfera (portanto na superfície do planeta). Logo, a representação de terrenos por mapas de altura é satisfatória.

Ao modelar um ambiente virtual é necessário definir *quais* elementos naturais serão representados e *como* serão. Primeiramente, os elementos que serão representado podem ser divididos em duas classes: os *Modelos da Paisagem* e os *Fenômenos Atmosféricos*. Estes problema são inerente aos propósitos específicos das aplicações.

Dividiremos os modelos da paisagem em duas categorias: *topografia* e *objetos da paisagem*. Estamos considerando como elementos topográficos os relevos e as regiões de fluxo e/ou acumulação de água. Os objetos da paisagem podem ser naturais (seres vivos em geral) ou não naturais (construções em geral). Analogamente, os fenômenos

atmosféricos podem ser agrupados em classes como a formação das nuvens, o processo de espalhamento de partículas no ar, as chuvas e a iluminação.

No contexto da topografia o problema se divide em dois: gerar o modelo e visualizá-lo. Existem diversas técnicas para gerar classes específicas de relevos (principalmente relevos no formato de morros/montanhas ou serras/cordilheiras). Mas, além de morros e montanhas, há outros relevos que aparecem em uma paisagem. Entre eles podemos citar: planícies, planaltos, chapadas, patamares, recifes, restingas, falésias, cânions, praias, vales e dunas. A Figura 4.2 ilustra algumas dessas classes de relevos. Além de haver diversas classes de relevos, em uma classe eles podem ser subdivididos de acordo com outras características geomorfológicas. Essas características podem ser geradas por *Forças Exógenas* (relacionadas a fenômenos climáticos) ou *Forças Endógenas* (relacionadas a atividades tectônicas). As forças endógenas costumam afetar um relevo em uma escala de tempo geológica, a menos de catástrofes naturais como erupções vulcânicas ou abalos sísmicos. Por outro lado, as forças exógenas, relacionadas principalmente a efeitos de águas (da chuva ou de rios) ou a temperatura, afetam continuamente um relevo. Essa ação gera fenômenos como erosão e sedimentação. Grosso modo, as forças exógenas são os principais fenômenos para determinar a macroestrutura de um relevo. Enquanto as forças endógenas são fenômenos que determinam as características da mesoestrutura.

Além da variação topográfica, o planeta ainda apresenta variações dos biomas. Um bioma é definido como um conjunto de seres vivos, seja animal ou vegetal, reunidos em uma região de vegetação contígua e identificável em escala regional; com condições climáticas similares; e diversidade biológica própria. Os principais biomas da Terra são: Tundra, Taiga, Floresta, Caducifolia ou Floresta Decídua Temperada, Floresta Tropical ou Floresta Pluvial ou Floresta Latifoliada, Campos, Deserto e Savanas. No Brasil os principais biomas são: Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica, Caatinga, Pampa e Pantanal.

No contexto de modelagem e visualização de terrenos a variação de topografia implica na necessidade de ter métodos de modelagem capazes de adequar-se a cada classe de relevos. Além de cobrir todas as classes, ainda é necessário contemplar mudanças geomorfológicas de cada relevo. A variação dos biomas implica prioritari-

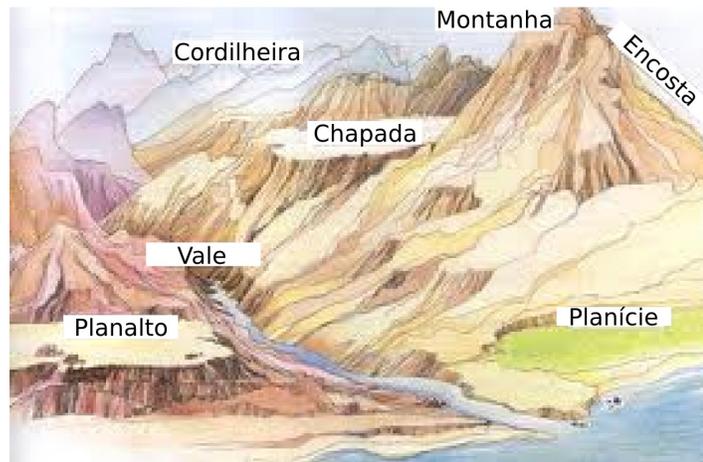


Figura 4.2: Tipos de Relevos.

amente em variação de atributos visuais. No caso das paisagens conterem objetos naturais, a variação de biomas também determina a variação da classe destes objetos.

A topografia da Terra pode ser representada por uma malha. Os elementos associados ao solo e a vegetação podem ser representados por texturas. Dependendo da aplicação e da visualização, pode ser necessário utilizar uma representação 3D para os objetos da paisagem. Por exemplo, modelos para representar árvores, seres vivos, construções, etc. Porém isso foge ao escopo dessa pesquisa. Uma discussão ampla sobre modelagem de plantas é apresentada por Prusinkiewicz e Lindenmayer [28]. Kelly e McCabe [29] apresentam uma visão geral sobre a área de modelagem de elementos urbanos.

Nas próximas seções, discutiremos com mais detalhe, as estruturas geométricas utilizadas para especificar a topografia (Seção 4.2) e as texturas para de determinar os aspectos visuais da paisagem (Seção 4.3).

4.2 Estruturas Geométricas

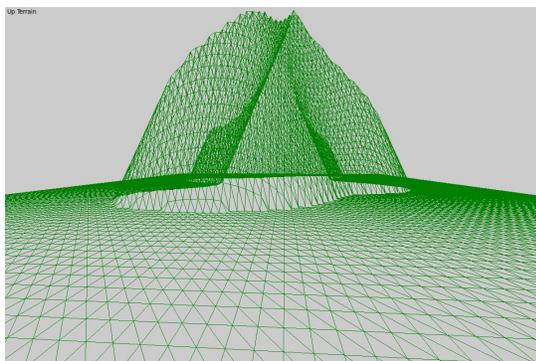
Na Seção, 2.2 foram apresentadas algumas formas para representar um terreno. Nesta seção discutiremos, em particular, técnicas para o formato de mapa de altura (DEM).

Temos basicamente duas formas: malha regular e malha em multirresolução. Um caso particular para malhas em multirresolução é utilizar superfícies de subdivisão adaptativa. Neste caso, podemos considerar cada nível da subdivisão como uma resolução da malha. A Figura 4.3 mostra esses exemplos de estruturas de malha.

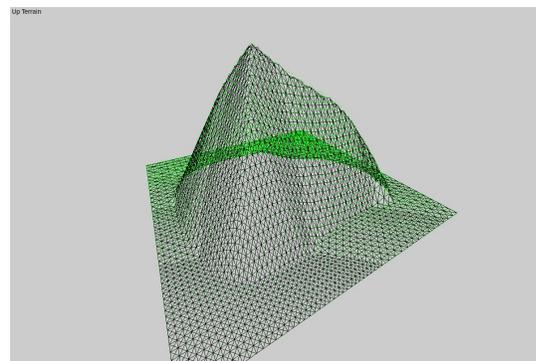
Algoritmicamente, o processo de visualização de uma superfície, representada por uma malha regular, é simples. Porém, em terrenos de grandes extensões esse processo é muito caro, haja visto que uma enorme quantidade de triângulos e seus atributos visuais deverão ser renderizados.

Muitas aplicações que visualizam tais modelos necessitam de eficiência. Nesta direção, existem critérios básicos que podem ser usados para simplificar esse modelo, otimizando o processo de visualização. O primeiro é excluir regiões da malha fora do volume de visão. Outra técnica é excluir regiões das quais as faces dos polígonos (normalmente triângulos) estão apontando na mesma direção da câmera (exclui-los com um algoritmo de *backface culling*). Finalmente, dentro do volume de visão, o nível de detalhe da malha pode variar, segundo alguns critérios, de modo que, aonde necessite de mais detalhes a malha deve estar com uma resolução maior do que aonde precisa menos.

Uma boa solução para resolver o problema do desperdício de processamento (muitos desses triângulos ocupam na tela uma área pequena, as vezes menor do



(a) Malha Regular



(b) Malha adaptada

Figura 4.3: Estruturas da Malha.

que um pixel) é utilizar uma malha em multirresolução, em vez de uma malha regular. Adotamos neste projeto uma malha de subdivisão adaptativa 4-8 (os vértices têm valência 4 ou 8) [30]. Em particular utilizamos uma biblioteca, denominada A48, desenvolvida baseando-se em operadores estelares [31].

Diversos algoritmos podem ser usados para obter essa malha adaptada. Podemos classificá-los em duas categorias: *dependentes do ponto de vista* e *dependentes do modelo*. Um critério dependente do ponto de vista é a resolução do triângulo ser inversamente proporcional à distância deste até a câmera. Essa distância pode ser calculada levando em consideração a média dos vértices do triângulo, algum vértice ou qualquer outro ponto significativo. Um critério de adaptação dependente do modelo é determinar que triângulos em regiões de baixa curvatura tenham resolução mais baixa do aqueles em áreas de alta curvatura.

Hoppe [32] apresentou uma abordagem para refinamento de malhas, baseando-se no ponto de vista. Hu et al. [22] apresentaram uma adaptação desta técnica, que utiliza os recursos de paralelismo oferecidos pelas placas gráficas.

Ainda há técnicas que divide o terreno em regiões com diferentes resoluções. No interior de cada região, a malha é regular. Losasso e Hoppe [21] apresentaram um trabalho que divide o terreno em grids regulares de diferentes resoluções.

4.3 Texturas

Como já comentado, além da geometria, os aspectos visuais também são responsáveis pela sensação de realismo do ambiente modelado. Podemos considerar como aspecto visual de um ambiente a iluminação (local e/ou global), a atmosfera [33] e a textura do modelo.

A forma mais simples de determinar um atributo visual é fixar uma função que associe a cada ponto da malha uma cor. A primeira forma testada para síntese de cor foi dividir regiões do relevo utilizando uma função baseada na altura do ponto, e em cada uma dessas regiões determinar uma cor. Caso o terreno tenha um bom nível de detalhes esta técnica irá gerar bons resultados (unida a algum método de iluminação). Caso contrário, uma técnica simples, que já proporciona um efeito

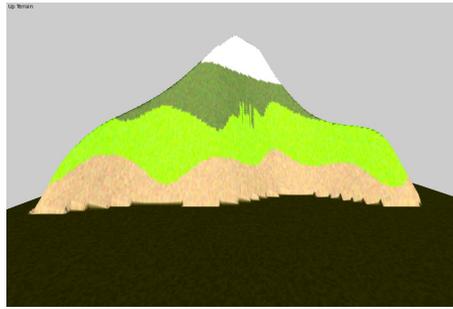


Figura 4.4: Síntese de cor por altura.

interessante, é perturbar as normais dos vértices da malha aleatoriamente. Isso evita que o terreno tenha seções monocromáticas. Essa é uma técnica ingênua para síntese de textura. Existem métodos mais sofisticados que utilizam funções específicas para a síntese [34]. A Figura 4.4 mostra um exemplo de um morro colorizado com a função supracitada e a perturbação nas normais.

Os métodos procedurais de síntese de textura tem vantagens e desvantagens sobre os métodos de mapeamento de uma imagem como textura. A primeira vantagem é que, para o primeiro, é necessário armazenar apenas algumas sementes, e com estas é possível sempre reconstruir a mesma textura do objeto. Estamos falando em escala de kilobytes para métodos procedurais, enquanto os métodos de mapeamento de imagens estão na escala de megabytes, quando não gigabytes (dependendo do tamanho da imagem). Outra vantagem é que os métodos procedurais não tem limite de resolução. Neste caso é possível chegar extremamente perto e obter uma visualização com bastante riqueza de detalhes. Além de poder aumentar a quantidade de detalhe ilimitadamente, a extensão do modelo também pode crescer ilimitadamente, ou seja, cobre extensões ilimitadas sem criar indesejados padrões na textura. Por outro lado, não é trivial definir uma função que gere uma textura de acordo com o desejo do artista. Além disso, determinar qual é a textura em um ponto do modelo é mais lento do que acessar o valor em uma imagem.

Um exemplo de método procedural para sintetizar textura é o Ruído de Perlin [6] A Figura 4.5 mostra um exemplo de textura gerado com tal técnica. Ebert et al.

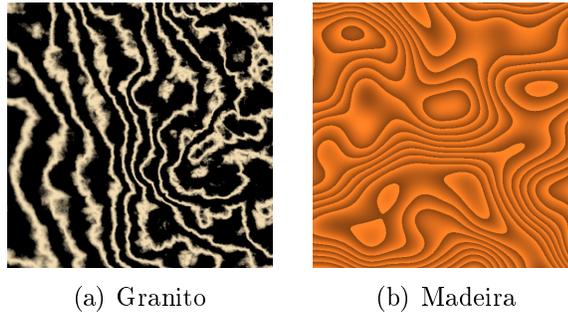


Figura 4.5: Ruído de Perlin.

[34] apresentaram esta, entre outras técnicas de síntese de textura procedural.

Para mapear imagens como textura é necessário definir uma função que associe cada ponto do objeto à uma coordenada da textura. A determinação desta função pode ser norteada por aspectos como: associação de regiões do modelo com uma imagem específica, escala da textura, tratamento da transição entre texturas, tratamento de distorções da textura, entre outros.

Ao utilizar uma imagem como textura é comum que a extensão do modelo seja maior do que a imagem a ser texturizada na escala adequada. Dessa forma é muito comum sintetizar uma textura mais ampla tomando a imagem original como exemplar [35, 36, 37]. Alguns exemplos ingênuos para sintetizar textura a partir de um exemplar são replicar várias cópias deste, copiar espelhando o exemplar (na horizontal e na vertical) e preencher o resultado com janelas aleatórias buscadas no exemplar. O segundo modo apresenta a vantagem de ser uma textura contínua, porém certos padrões provenientes da técnica ficam explícitos. A terceira técnica não apresenta o problema dos padrões, porém apresenta descontinuidades nas bordas das janelas colocadas. A Figura 4.6 mostra exemplos de textura sintetizada com as abordagens citadas.

Outra técnica muito comum em síntese de textura é criar um modelo em multi-escalas [38]. Já discutimos a relevância de utilizar uma estrutura geométrica multi-escala. No caso das texturas, a necessidade é a mesma. Uma experiência ingênua é combinar duas imagens em escalas diferentes. A Figura 4.7 mostra um exemplo de

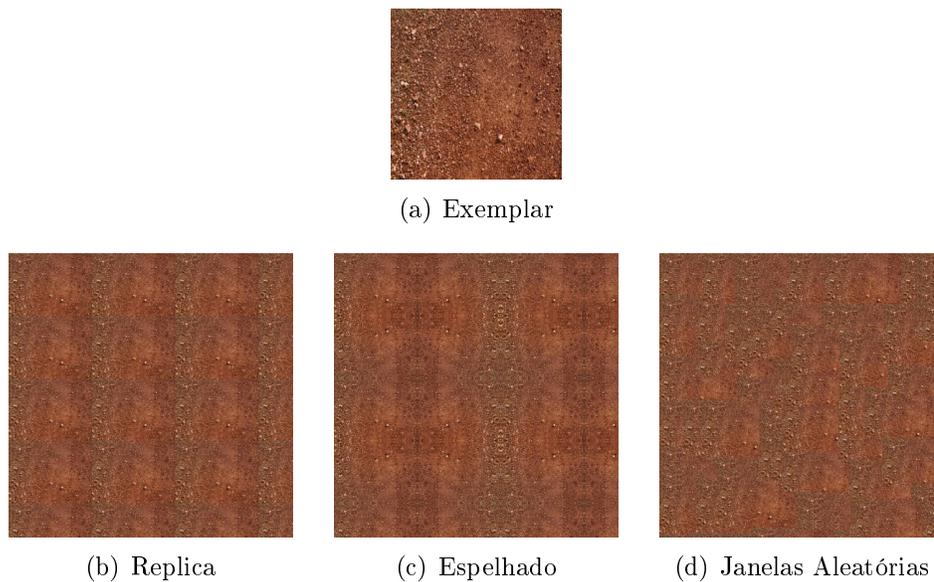


Figura 4.6: Síntese de Textura por exemplar.

uma imagem gerada usando esta técnica.

A natureza é visualmente muito complexa. O principal objetivo na modelagem de um ambiente virtual é reproduzir os elementos do ambiente modelado com realismo. Essa busca passa por combinar a geometria do objeto com seus atributos visuais, para obter uma representação visualmente satisfatória. Nessa combinação um elemento pode ter distintas representações, assim como cada representação pode ter distintas escalas.

A Figura 4.8 mostra um exemplo da variação das características visuais do Kilimanjaro na África. Esta montanha tem 5891 metros de altura. Ao seu pé há o Parque Nacional do Kilimanjaro, um bioma florestal no leste da África. A Figura 4.8a mostra a África. Esta imagem representa uma área de 15000km de largura por 9100km de altura. Destacam-se três biomas: o deserto ao norte, as savanas e florestas no centro e regiões semiáridas ao sul. O Parque Nacional do Kilimanjaro (Figura 4.8c) fica no leste da África (Figura 4.8b). A Figura 4.8b representa uma área de 1600km de largura por 850km de altura, enquanto a Figura 4.8c, é uma

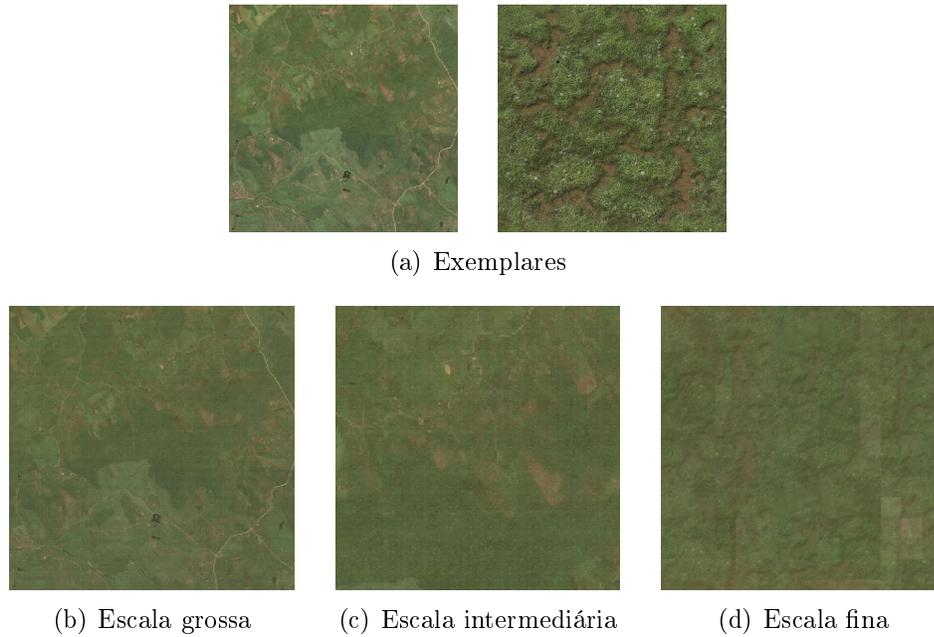


Figura 4.7: Síntese de Textura em Multiescala.

área de 96km de largura por 58km de altura. O Bioma ao qual o Parque faz parte consiste em uma Floresta tropical cercada de savanas. Desta forma na textura do parque predomina-se o verde da floresta. Porém, ao centro está o Kilimanjaro. Devido sua altura e grande extensão, o visual deste relevo se diferencia de seu bioma. Na Figura 4.8d, pode se observar uma parte do topo desta montanha, aonde o visual é completamente diferente do que se via no parque. Esta imagem mostra uma região de 6km de largura por 3km. Todas as imagens foram obtidas no *GoogleEarth*.

Esse exemplo mostra a diferença dos aspectos visuais percebidos a cada escala. Neste caso, é necessário uma textura em multiescala para representar estes aspectos a cada escala.

O problema de mapeamento de textura é outra grande questão da área. Ao definir a imagem a ser texturizada em um terreno é necessário mapear os vértices da malha com sua respectiva coordenada de textura. Maillot et al. [39] apresentaram uma solução interativa para este problema. Outra referência da área é Hechbert [40].

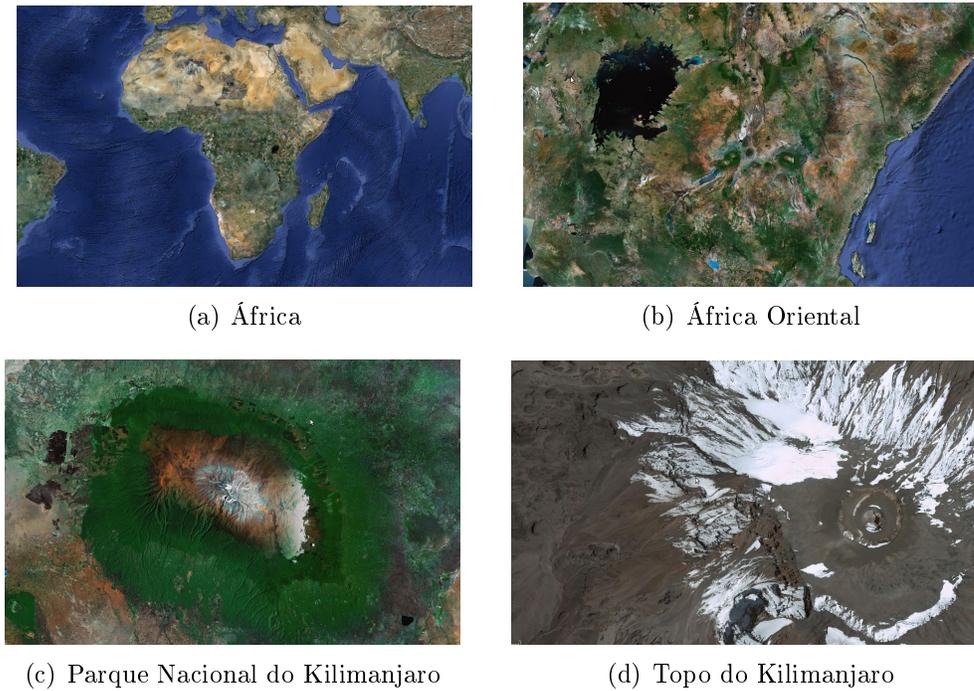


Figura 4.8: Diferentes pontos de vista do Kilimanjaro, como exemplo de variações de informações em escalas distintas.

Diversas outras técnicas referentes a síntese e mapeamento de textura ainda podem ser exploradas. Este é um dos tópicos prioritários para os próximos trabalhos, na continuação desta pesquisa. No próximo capítulo discutiremos alguns aspectos sobre autoria de terrenos. Em particular, também discutiremos alguns tópicos sobre visualização, implementados nos aplicativos desenvolvidos para testar alguns conceitos apresentados nesta dissertação.

Capítulo 5

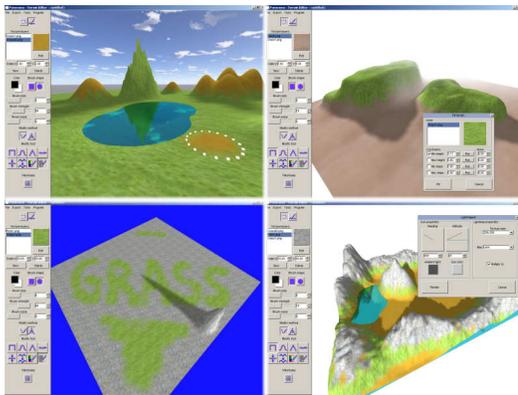
Autoria de Terrenos

5.1 Aplicações Existentes

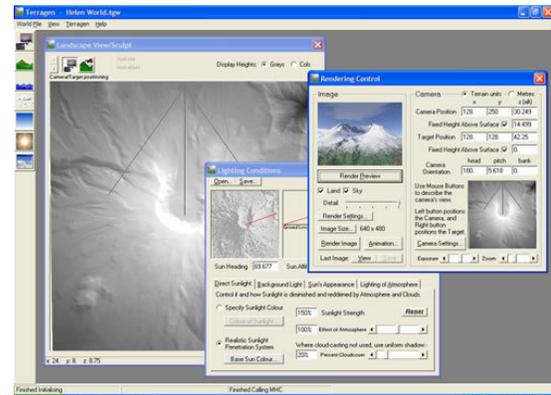
Ao longo deste trabalho discutimos as diversas técnicas para autoria de terrenos. Resumindo, essas técnicas se dividem em métodos procedurais e métodos baseados em sketches. Alguns trabalhos exploraram sketches para parametrizar certos métodos procedurais para gerar terreno. Porém, acreditamos que o potencial da utilização de sketches na especificação de grandes terrenos ainda não foi devidamente explorado.

A maioria dos trabalhos que utilizam sketches são bons para especificar relevos individualmente. Dessa forma, são bons para um artista criar uma paisagem pequena. Com estes métodos, o artista especifica, com sketches, características de macroestrutura. Para sintetizar detalhes, esses trabalhos utilizam métodos procedurais, geralmente baseados em ruídos fractais. Em contrapartida, os métodos procedurais são bem rápidos para construir grandes paisagens, mas oferecem menos controle ao artista. Acreditamos que ainda há muito o que se explorar na combinação dessas duas abordagens.

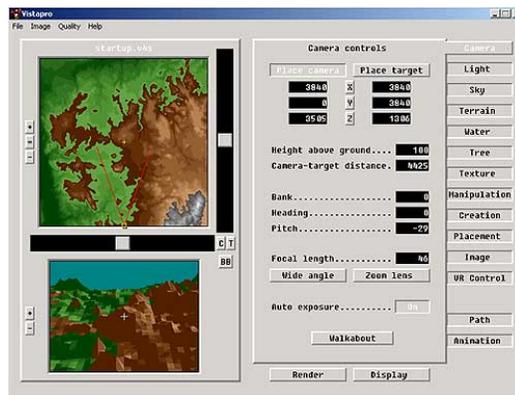
Os principais softwares utilizados para geração de relevos normalmente utilizam métodos procedurais para gerar uma paisagem. Além do procedimento automático, permitem ao artista adicionar alguns elementos como certos relevos, árvore, águas, etc. Eles permitem fazer edições no terreno utilizando ferramentas relacionadas



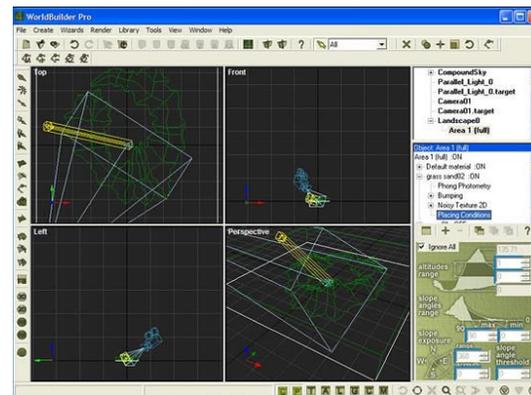
(a) Panorama Terrain Editor



(b) Terragen



(c) Vista Pro

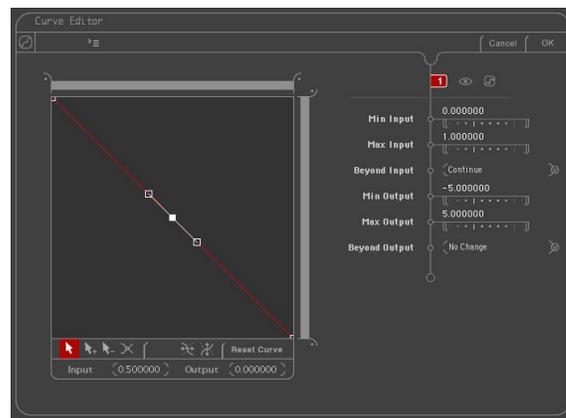


(d) World Builder

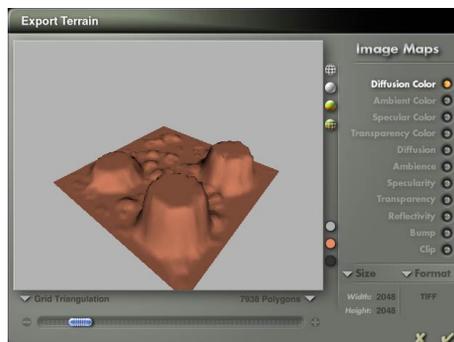
Figura 5.1: Softwares para modelagem de terreno.

a operações geométricas ou visuais. A Figura 5.1 mostra alguns exemplos destes softwares.

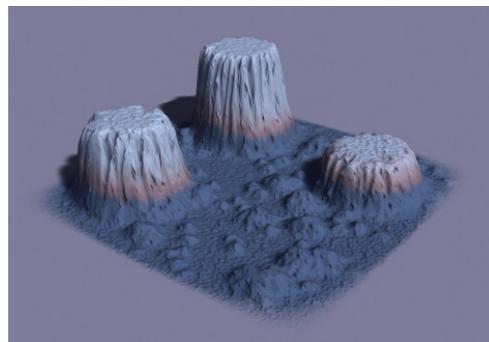
Para parametrizar os métodos automáticos de criação de terrenos, o artista manipula uma interface não muito intuitiva, aonde deve determinar parâmetros numéricos ou mover *sliders* para decidir as características da superfície modelada que sejam adequadas ao terreno desejado. A utilização de sketches deixa esse processo mais intuitivo e preciso. A Figura 5.2 mostra um exemplo de como essas interfaces não são intuitivas. Neste exemplo, a Figura 5.2a mostra essa interface com os controles dos parâmetros do método de adição de detalhes.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.2: Interface do software Bryce.

5.2 Sketch-based Terrain

Durante o desenvolvimento deste trabalho foi implementado uma ferramenta para gerar terrenos baseando-se em sketches, denominada *Sketch-Based Terrain*. Essa é uma biblioteca, escrita em C++, que utiliza recursos do Qt, para definir de objetos de interfaces; OpenGL para renderização; e módulos próprios para modelagem e visualização de terrenos. Com essa ferramenta desenvolvemos algumas aplicações para testar diversos conceitos apresentados neste trabalho. A principal dessas aplicações tem o objetivo de apresentar uma interface fácil de manipular e aprender. Com esta aplicação, o usuário deve ser capaz de gerar relevos com macroestrutura realista, utilizando sketches para especificar o modelo, segundo o que foi apresentado na Capítulo 3. Consideramos como principais contribuições dessa ferramenta apresentar simultaneamente múltiplas visões do terreno, o que possibilita uma melhor compreensão do modelo; apresentação de sugestões de possíveis relevos, associado a um sketch; consulta de relevos em uma base de dados, previamente preenchida. Nesta seção discutiremos alguns aspectos destas ferramentas, exemplificando as funcionalidades implementadas e destacando possibilidades de extensões.

A arquitetura referente a terrenos, da nossa biblioteca, consiste em três módulos: Modelagem, Representação e Visualização de Terrenos. Ao longo dessa seção explicaremos como esses módulos funcionam (o que foi implementado) e como podem ser

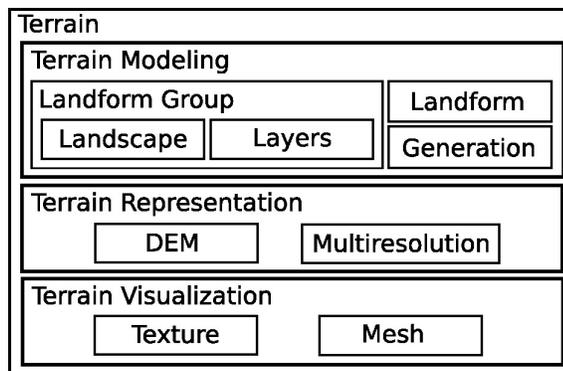


Figura 5.3: Arquitetura do Framework.

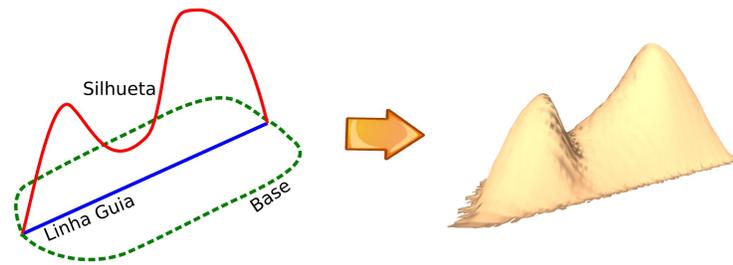


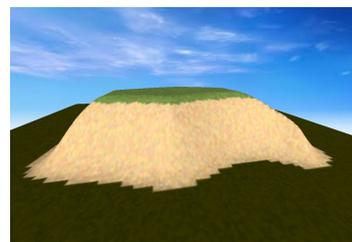
Figura 5.4: Especificação de Relevos.

estendidos. A Figura 5.3 mostra um esquema dessa arquitetura.

Como definimos, um terreno é um conjunto de relevos. Logo, criar um terreno consiste em especificar e posicionar alguns relevos. O processo de especificação de um relevo particular consiste em determinar os sketches e, eventualmente, alguns parâmetros para adição de detalhes. Como citado anteriormente, os sketches adotados para gerar um relevo são os da base, as linhas guias e as silhuetas. A Figura 5.4 mostra um esquema que associa os sketches a um relevo.



(a) Morro



(b) Planalto



(c) Vulcão



(d) Ilha

Figura 5.5: Tipos de relevos.

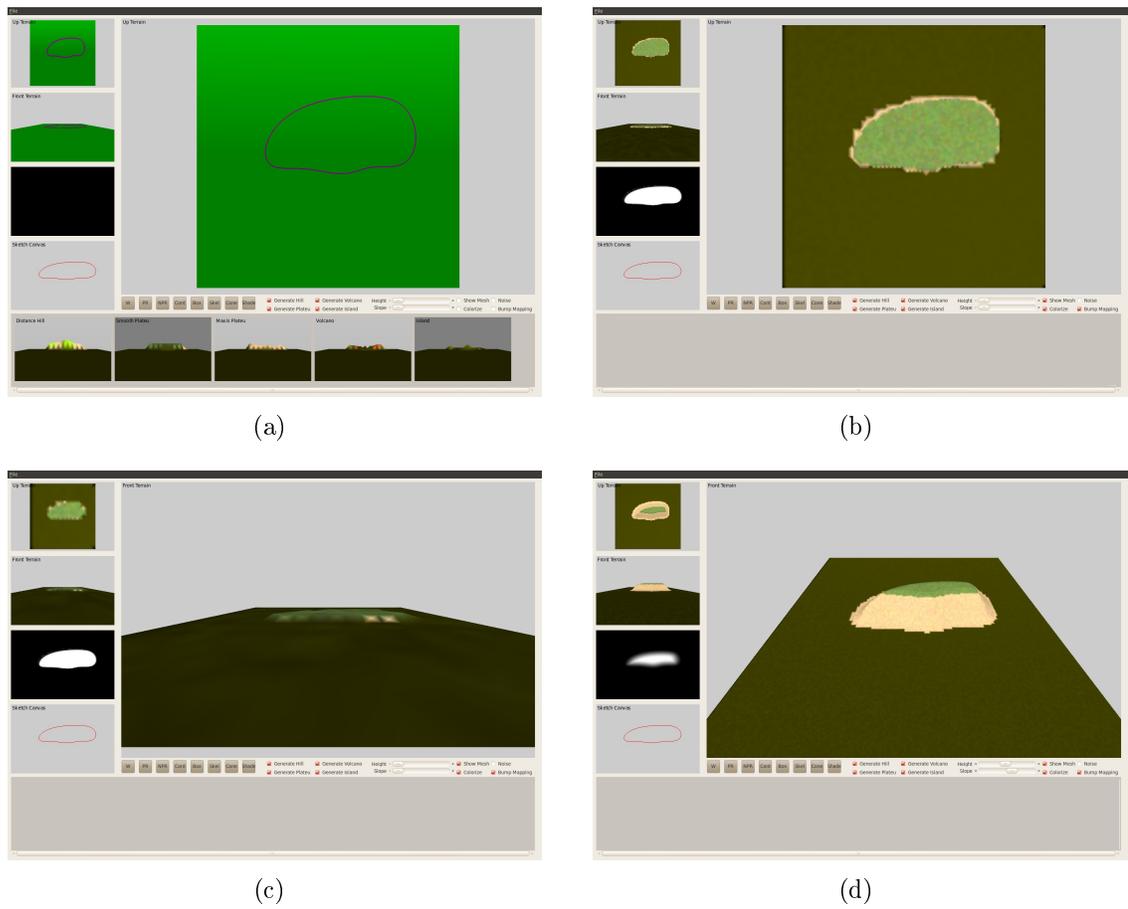


Figura 5.6: Aplicação de Modelagem.

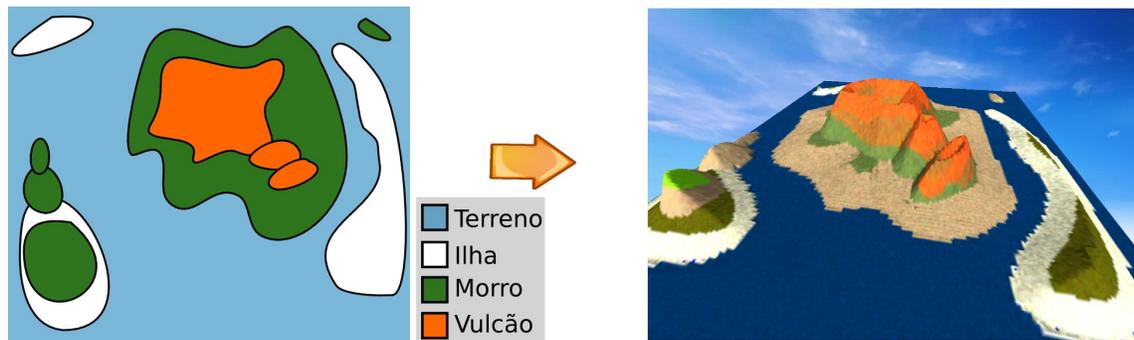


Figura 5.7: Paisagem colorida.

Os relevos implementados foram: morros, planaltos, vulcões e ilhas. A Figura 5.5 mostra um exemplo de cada um desses tipos de relevos implementados. Esses elementos estão implementados no módulo *Landform*.

A forma de agrupar um relevo, segundo nossa conceituação, não é única. A forma mais simples é considerar o terreno como uma paisagem, aonde cada relevo tem uma semântica equivalente. Nesse caso um terreno é apenas um conjunto de relevos. Outra forma, é hierarquizar os elementos de um terreno em camadas. A representação de terrenos no formato de paisagem está implementado no módulo *Landscape*.

Considerando o terreno como uma paisagem, o problema de especificação consiste em posicionar os sketches, associá-los a um tipo de relevo e definir seus parâmetros. A Figura 5.7 mostra um exemplo de paisagem composta por ilhas, morros e vulcões.

É possível variar a função de perfil de um relevo apenas mudando um atributo do tipo *Generation*. Com as abstrações *Landform* e *Generation*, facilmente pode-se estender o framework, adicionando um novo relevo ou uma função de perfil.

Para o processo de especificação foram implementados um conjunto de elementos de interface que possibilitem determinar facilmente os parâmetros dos métodos de modelagem, e elementos que propiciem uma boa compreensão do terreno modelado. A Figura 5.6a mostra a interface da aplicação desenvolvida para modelar terrenos, no formato paisagem. Neste exemplo, o usuário começa especificando um relevo a partir

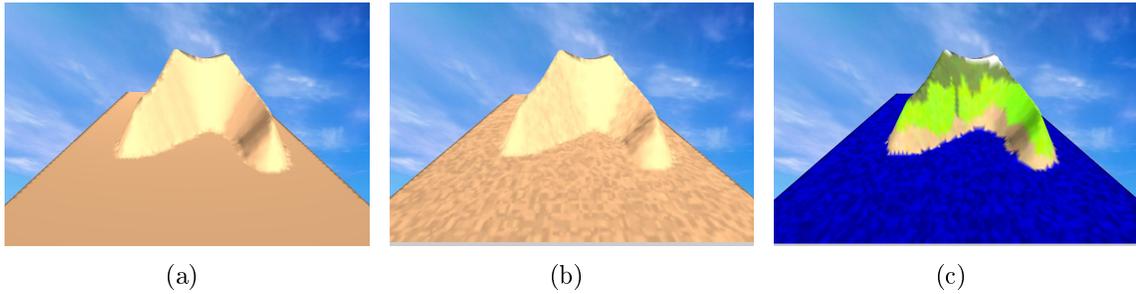


Figura 5.8: Shading e Colorização.

do desenho do sketch da base, na vista superior. A aplicação sugerirá alguns exemplos de possíveis relevos que podem ser escolhidos. Essas sugestões são apresentadas como uma lista de *thumbnails* exibida na parte inferior da janela principal da aplicação. Para escolher uma dessas sugestões, basta clicar na respectiva imagem. Em seguida, o modelo do terreno será atualizado, incorporando o relevo escolhido, posicionado de acordo com o sketch.

Após a escolha da sugestão do relevo, ainda há alguns parâmetros que podem ser atualizados. Nessa aplicação o usuário pode editar a altura e o comprimento da encosta do relevo. A escolha desses parâmetros é feita através de dois *sliders*. A Figura 5.6d mostra um exemplo de um planalto criado, cuja altura e encosta foram parametrizadas da forma citada, modificando o modelo original exibido na Figura 5.6c.

Essa aplicação oferece ao usuário algumas visualizações distintas do terreno que está sendo modelado. Além da área principal de trabalho (espaço para especificar os relevos e visualizar o terreno resultante), à esquerda da janela principal são exibidas uma vista superior e outra frontal deste terreno. Além destas, exibimos o terreno como uma imagem em escala de cinza (aonde o branco é o ponto mais alto do terreno, e o preto é o mais baixo). Outro feedback dado ao usuário na mesma região é a curva referente ao último sketch desenhado. Esta região também pode ser utilizada para editar o sketch. Além disso, as pseudo-silhuetas podem ser especificadas neste mesmo

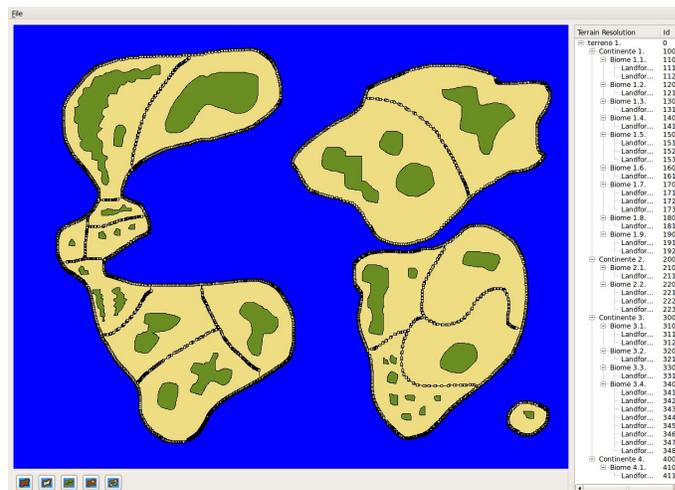


Figura 5.9: Sketches de diferentes camadas.

local.

Um aspecto importante dessa aplicação são as duas visões do terreno: superior e frontal. Curvas de base e linhas guias são desenhadas no modo de visualização superior, enquanto silhuetas são desenhadas no modo de visualização frontal. O processo de edição de parâmetros pode ocorrer em qualquer modo. As Figuras 5.6b e 5.6c mostram a vista superior e frontal, respectivamente.

Neste aplicativo, um terreno pode ser visualizado mostrando apenas o shading ou através de um esquema de síntese de cor baseado na altura do ponto. Além disso, é possível, através de uma perturbação nas normais dos vértices da malha, obtendo um efeito de ruído na cor. Esses fenômenos são exemplificados na Figura 5.8.

Embora a única representação utilizada tenha sido o DEM, o mecanismo de representação é suficientemente flexível para utilizar outras estratégias. Por exemplo, até mesmo o DEM pode ser implementado de formas distintas (como uma matriz, ou uma QuadTree, por exemplo).

Uma outra ferramenta que desenvolvemos, especificando terrenos com sketches, utiliza o conceito de camadas (módulo *Layers*). Nessa ferramenta o usuário faz as curvas continentais, divide um continente em biomas e insere alguns relevos dentro de

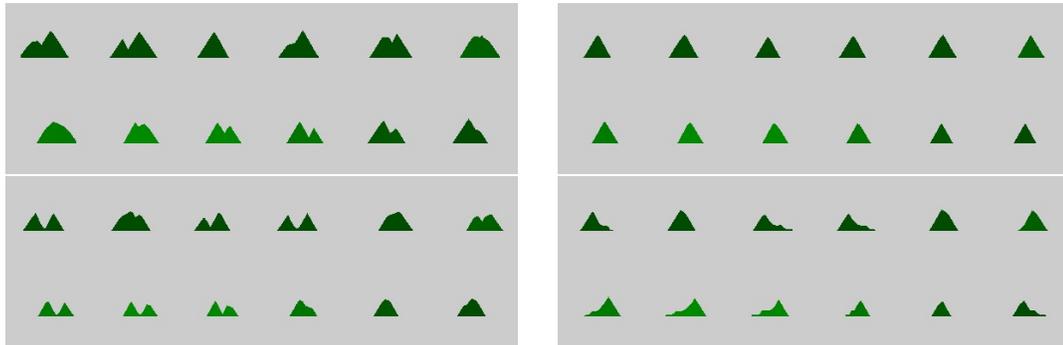


Figura 5.10: Pontos de vista de um relevo.

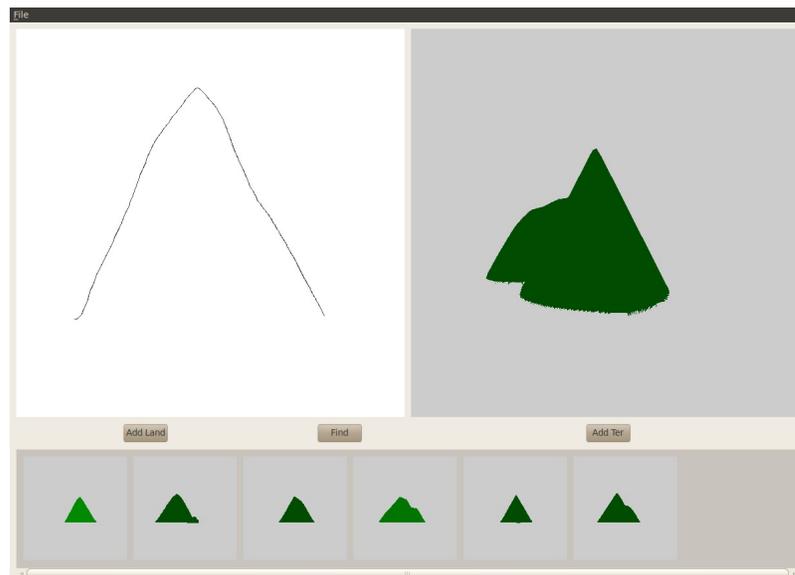


Figura 5.11: Busca de Relevos.

cada bioma. Além disso ele pode parametrizar cada um desses elementos, segundo a necessidade. A Figura 5.9 mostra um exemplo de uso dessa aplicação. Os elementos de cada camada são abstratos, e portanto podem ser implementados de diferentes formas, ou seja, podem usar diferentes técnicas de síntese.

Um trabalho futuro é ampliar os estudos sobre métodos teleológicos para síntese de terrenos e utilizar os dados especificados nessa ferramenta para gerar terrenos de grandes extensões com as características geomorfológicas desejadas.

Outra ferramenta implementada para adicionar um relevo a um terreno baseia-se na busca, em uma base de dados, por relevos já modelado. Esta busca é feita a partir do sketch da silhueta do relevo. Essa funcionalidade inicia-se preenchendo a base de dados com alguns relevos. Para cada relevo captura-se a silhueta em doze pontos de vista distintos, e armazena-se essa informação após normalizá-la. A Figura 5.10 mostra exemplos de alguns relevos visto nos doze pontos de vista.

A partir de um sketch desenhado pelo usuário, a aplicação normaliza-o e calcula a diferença entre essa curva e as silhuetas normalizadas, em cada ponto de vista de cada relevo armazenado. Caso haja relevos a uma distância (nessa métrica proposta) inferior a um ϵ dado, a foto, da qual a silhueta possui essa distância, é sugerida (os resultados são ordenados crescentemente de acordo com essa distância). O usuário pode então selecionar qual relevo ele prefere adicionar a seu terreno. A Figura 5.11 apresenta um exemplo de uso dessa ferramenta.

Além da geometria, atacamos algumas técnicas relacionadas aos aspectos visuais do terreno. Neste trabalho utilizamos um modelo simples de iluminação (iluminação local por *Phong Shading*) e não fizemos nada referente a atmosfera (apenas para gerar alguns resultados renderizamos um céu utilizando a técnica de *cube mapping*). Além disso, atacamos alguns tópicos referente a texturas.

Para o problema de mapeamento de textura em um terreno, utilizamos uma abordagem simples aonde o usuário especifica, através de sketches, as regiões de cada textura. A Figura 5.12 mostra a aplicação de mapeamento de textura implementada e um exemplo de teste.

A Figura 5.13 mostra outro exemplo de mapeamento de textura. Neste caso, o sketch é feito sobre uma imagem referente ao DEM de um terreno. Cada região é

associada a uma textura e o resultado é mapeado no modelo.

Durante o processo de Mapeamento de Textura pode-se desejar realizar um *blending* entre duas regiões diferentes para evitar descontinuidades de texturas. Em nossa aplicação o usuário clica em uma fronteira e a aplicação determina a vizinhança que será interpolada. A Figura 5.14 mostra um exemplo de blending entre texturas.

Os protótipos apresentados tem o objetivo de testar alguns conceitos apresentados ao longo dessa dissertação. O framework, assim como as aplicações de teste estão disponíveis em <http://www.impa.br/~lcruz/research/terrain-modeling/sbt.tar.gz>. Não fazia parte do escopo deste trabalho desenvolver uma aplicação completa em todas as esferas da área. Porém, através de testes com um conjunto mais reduzido de técnicas, conseguimos identificar diversos problemas da área, explorar algumas possibilidades e criar bases para pesquisas futuras explorando essas tendências.

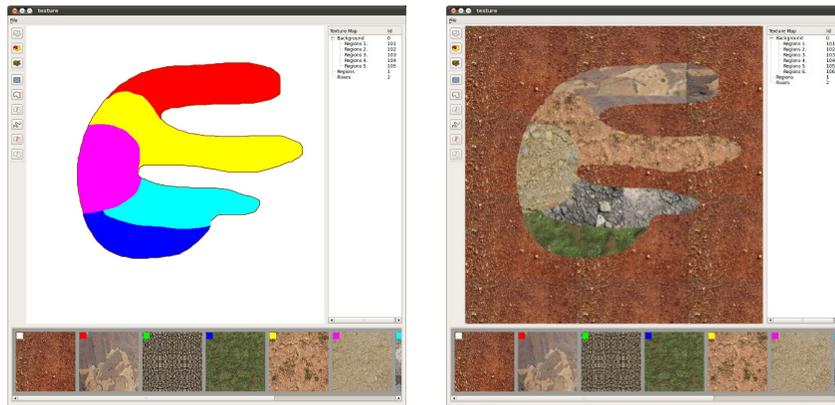


Figura 5.12: Aplicação de Mapeamento de Textura.



Figura 5.13: Mapeamento de textura.



Figura 5.14: Blending de Textura.

Capítulo 6

Conclusão

Nos propomos, neste trabalho, apresentar uma visão geral da área de modelagem e visualização de terrenos, abordando os principais problemas, citando alguns dos principais trabalhos, e identificando algumas possibilidades, desafios e tendências da área. Embora seja uma área razoavelmente antiga da computação gráfica (alguns trabalhos muito importante foram publicados entre o fim da década de 70 e o início da década de 90), recentemente tem-se feito novas pesquisas sobre este tema. Essas pesquisas exploram novas possibilidades, como o uso de placas gráficas mais poderosas, utilização de bases de dados reais, e avanços no processo de renderização. Com isso, tem-se conseguido gerar modelos de paisagens cada vez mais realistas.

Referente à modelagem, abordamos o processo de especificação utilizando sketches, apresentamos algumas formas de representação e alguns métodos procedurais para síntese de um terreno. Referente à visualização, apresentamos tópicos relativos a quais elementos podem, e como podem, ser representados em uma paisagem; as possíveis estruturas geométricas e os atributos visuais, principalmente a textura, utilizadas na representação destes elementos.

No que tange ao processo de especificação de relevos, mostramos alguns trabalhos que utilizam prioritariamente sketches referente a uma silhueta de um terreno para especificar um modelo. Essa abordagem é uma analogia ao modo como um artista desenha uma paisagem, através de um ponto de vista frontal. Além disso, apresentamos uma abordagem de especificação semelhante à utilizada pelos topógrafos. Nessa

abordagem, os sketches especificados referem-se a curvas observadas em uma vista superior. Essas curvas foram divididas basicamente em duas classes: base e linhas guias. Esse ponto de vista também é muito utilizado em métodos procedurais que simulam fenômenos físicos. Esses métodos baseiam-se em curvas de picos de morros, vales, rios e falésias.

Segundo o método proposto, o processo de modelagem do relevo, utilizando curvas de base e linhas guias, consiste em determinar a função de altura do relevo. Basear a função de altura de um ponto na sua distância até a sua projeção na base é coerente com características morfológicas de um relevo. Por exemplo, espera-se que um morro seja mais alto nos pontos afastados da base e mais baixo próximo desta. Espera-se que a altura dos pontos de um planalto, a medida em que se afasta da base, cresçam até o base superior. Assim como essas, para cada tipo de relevo a função de altura foi determinada considerando-se tais características geomorfológicas.

Sobre os processos de modelagem apresentamos duas categorias de métodos: os ontogenéticos, que priorizam um caráter visualmente satisfatório; e os teleológicos, que priorizam um caráter de coerência geomorfológica.

A abordagem de especificação e síntese, proposta neste trabalho, modela apenas a macroestrutura de um relevo. Para obter um maior realismo é necessário sintetizar detalhes sobre estas superfícies. Os métodos de modelagem supracitados podem ser utilizados para tal. A síntese de detalhes é necessária para agregar realismo ao modelo. Além disso, em busca de uma coerência geomorfológica, os métodos de síntese são suficientemente flexíveis para serem configurados para gerar classes específicas de modelos com suas características específicas. Nessa linha, um trabalho futuro é determinar outras classes de funções de altura e de perfil que configurem o nosso método de modelagem para obter relevos com diferentes características geomorfológicas.

Outra linha promissora para futuros trabalhos é manipular terrenos extensos (como planetóides). Nesta linha surgem problemas não abordados nesta pesquisa, como armazenamento e busca de informações em banco de dados; e busca por melhoria na performance para visualização do terreno. Uma meta é ser capaz de construir um planetóide e grandes paisagens, com todas suas idiosincrasias geométricas e visuais.

Outra direção muito promissora é utilizar dados reais para auxiliar o processo de modelagem de ambientes virtuais. Podemos citar como dados reais as fotografias, amplamente acessíveis na internet, e base de dados de elevação. Esta linha, além de acelerar o processo de modelagem, haja visto que o modelo do relevo está pronto (até certa escala), agrega ao processo de modelagem a garantia da preservação da coerência geomorfológica, visto que está manipulando modelos de relevos reais geomorfologicamente verossímil.

A pesquisa apresentada neste trabalho, além de uma visão generalista da área, e algumas contribuições metodológicas, serviu para delinear futuras outras pesquisas sobre o tema. Dentre o todo que se foi estudado e desenvolvido, muitos trabalhos futuros foram identificados. Pretendemos, quase que de imediato, abordá-los, dando continuidade ao projeto de pesquisa iniciado nesta dissertação.

Referências Bibliográficas

- [1] Leandro Cruz. Biosfera. 2010. <http://www.impa.br/lcruz/courses/pi/terrenos-biosfera.pdf>.
- [2] Leandro Cruz. Base de imagens de elementos de terrenos e paisagens. 2010. <http://w3.impa.br/lcruz/courses/pi/bd/>.
- [3] Benoit B. Mandelbrot. Stochastic models for the earth's relief, the shape and the fractal dimension of the coastlines, and the number-area rule for islands. In Proceedings of the National Academy of Sciences (USA), 1975.
- [4] Benoit B. Mandelbrot. *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman and Co, 1983.
- [5] Alain Fournier, Don Fussell, and Loren Carpenter. Computer rendering of stochastic models. Communications of the ACM, 1982.
- [6] Ken Perlin. An image synthesiser. ACM SIGGRAPH, 1985.
- [7] Gavin S. P. Miller. The definition and rendering of terrain maps. ACM SIGGRAPH, 1986.
- [8] Forest K. Musgrave, Craig E. Kolb, and Robert S. Mace. The synthesis and rendering of eroded fractal terrains. ACM SIGGRAPH, 1989.
- [9] Bedrich Benes and Rafael Forsbach. Layered data representation for visual simulation of terrain erosion. In Proceedings of the 17th Spring conference on Computer graphics, 2001.

- [10] Manuel N. Gamito and Forest Kenton Musgrave. Procedural landscapes with overhangs. In Proceedings of 10th Portuguese Computer Graphics Meeting, 2001.
- [11] Richard F. Voss. Random fractal forgeries. Springer-Verlag, 1985.
- [12] Gary A. Mastin, Peter A. Watterberg, and John F. Mareda. Fourier synthesis of ocean scenes. IEEE Computer Graphics and Applications, 1987.
- [13] Heinz-Otto Peitgen and Dietmar Saupe. *The Science of Fractal Images*. Springer-Verlag New York, Inc, 1988.
- [14] Houssam Hnaidi, Eric Guérin, Samir Akkouche, Adrien Peytavie, and Eric Galin. Feature based terrain generation using diffusion equation. In Proceedings of Pacific Graphic, 2010.
- [15] Farès Belhadj. Terrain modeling: a constrained fractal model. AFRIGRAPH, 2007.
- [16] Howard Zhou, Jie Sun, Greg Turk, and James M. Rehg. Terrain synthesis from digital elevation models. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007.
- [17] Nguyen Hoang Anh, Alexei Sourin, and Parimal Aswani. Physically based hydraulic erosion simulation on graphics processing unit. ACM GRAPHITE, 2007.
- [18] Ondrej St'ava, Bedrich Benes, Matthew Brisbin, and Jaroslav Krivánek. Interactive terrain modeling using hydraulic erosion. Eurographics Symposium on Computer Animation, 2008.
- [19] Giliam J. P. de Carpentier and Rafael Bidarra. Interactive gpu-based procedural heightfield brushes. In Proceedings of the 4th International Conference on Foundations of Digital Games, 2009.

- [20] Jens Schneider, Tobias Boldte, and Rüdiger Westermann. Real-time editing, synthesis, and rendering of infinite landscapes on gpus. In Proceedings of Conference on Vision, Modeling, and Visualization, 2006.
- [21] F. Losasso and H. Hoppe. Geometry clipmaps: Terrain rendering using nested regular grids. ACM SIGGRAPH, 2004.
- [22] Liang Hu, Pedro V. Sander, and Hugues Hoppe. Parallel view-dependent refinement of progressive meshes. In Proceedings of Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, 2009.
- [23] Jonathan M. Cohen, John F. Hughes, and Robert C. Zeleznik. Harold: a world made of drawings. NPAR, 2000.
- [24] Nayuko Watanabe and Takeo Igarashi. A sketching interface for terrain modeling. ACM SIGGRAPH Posters, 2004.
- [25] James Gain, Patrick Marais, and Wolfgang Straber. Terrain sketching. Symposium on Interactive 3D graphics and games, 2009.
- [26] Roberto de Beauclair Seixas, Luiz Henrique de Figueiredo, Claudio Antonio da Silva, and Paulo Cezar Pinto Carvalho. Uma metodologia para geração de modelos de elevação a partir de curvas de nível. GeoInfo, 2000.
- [27] Roberto de Beauclair Seixas, Luiz Henrique de Figueiredo, and Claudio Antonio da Silva. Interpolação de curvas de nível por difusão de calor. GeoInfo, 2001.
- [28] Prusinkiewicz and Lindenmayer. *The Algorithmic Beauty of Plants*. Springer-Verlang, 1990.
- [29] G. Kelly and H. McCabe. A survey of procedural techniques for city generation. Institute of Technology Blanchardson Journal, 2006.
- [30] Luiz Velho and Denis Zorin. 4-8 subdivision. Special Issue on Subdivision Techniques, 2001.

- [31] Luiz Velho. A dynamic adaptative mesh library based on stellar operators. *Journal of Graphics Tools*, 2004.
- [32] Hugues Hoppe. View-dependent refinement of progressive meshes. *ACM SIGGRAPH*, 1997.
- [33] Eric Bruneton and Fabrice Neyret. Precomputed atmospheric scattering. *Eurographics - Symposium on Rendering*, 2008.
- [34] David Ebert, F. Kenton Musgrave, Darwyn Peachey, Ken Perlyn, and Steven Worley. *Texturing and Modeling: A procedural approach*. Academic Press, 1998.
- [35] L. Wei and M. Levoy. Fast texture synthesis using tree-structured vector quantization. *ACM SIGGRAPH*, 2000.
- [36] S. Lefebvre and H. Hoppe. Parallel controllable texture synthesis. *ACM SIGGRAPH*, 2005.
- [37] Michael Ashikhmin. Synthesizing natural textures. In *Proceedings of Symposium on Interactive 3D graphics*, 2001.
- [38] R. Ramamoorthi C. Han, E. Risser and E. Grinspun. Multiscale texture synthesis. *ACM SIGGRAPH*, 2008.
- [39] Jérôme Maillot, Hussein Yahia, and Anne Verroust. Interactive texture mapping. *ACM SIGGRAPH*, 1993.
- [40] Paul S. Heckbert. *Survey of texture mapping*. Computer Science Press, 1988.