

SisterApp: Plataforma de Ecologia Computacional v3.8.4

Manual Técnico de Modelos Computacionais

José Pedro Trindade

17 de dezembro de 2025

Conteúdo

| | | |
|----------|---|----------|
| 1 | Introdução | 3 |
| 2 | Modelo de Vegetação | 3 |
| 3 | Geração de Topologia (Terrain Models) | 3 |
| 3.1 | Modelo Experimental Blend (v3.8.3) | 3 |
| 3.2 | Perfis Padrão | 3 |
| 4 | Configuração do Usuário | 4 |
| 4.1 | Variáveis de Controle Espacial | 4 |
| 5 | Modelo de Drenagem (D8 Flow) | 4 |
| 5.1 | Direção do Fluxo (Flow Direction) | 4 |
| 5.2 | Acumulação de Fluxo (Flow Accumulation) | 4 |
| 5.3 | Visualização | 5 |
| 6 | Análise de Bacias Hidrográficas (Watershed Analysis) | 5 |
| 6.1 | Segmentação Global | 5 |
| 6.2 | 2. Delineação Interativa | 5 |
| 6.3 | 3. Visualização de Contornos | 5 |
| 7 | Métricas Eco-Hidrológicas | 5 |
| 7.1 | Índice Topográfico de Umidade (TWI) | 6 |
| 7.2 | Densidade de Drenagem (D_d) | 6 |
| 7.3 | Estatísticas por Bacia (Basin-Level Metrics) | 6 |
| 7.4 | Geração Assíncrona (v3.8.3) | 6 |
| 8 | Resolução Espacial Variável (V3.6.5) | 6 |
| 8.1 | Definição de Escala | 6 |
| 9 | Módulo de Análise de Solos (V3.7.3) | 7 |
| 9.1 | Metodologia: Ruído Coerente e Métricas de Paisagem (v3.8.0) | 7 |
| 9.2 | Minimap e Navegação Interativa | 7 |
| 9.3 | Classes e Cores | 8 |

1 Introdução

O **SisterApp** evoluiu de uma engine gráfica para uma plataforma científica robusta focada em ecologia computacional. A versão 3.8.0 consolida ferramentas de navegação, análise de paisagem e validação métrica. A versão 3.8.4 remove definitivamente o suporte a Voxel para focar em terrenos de alta fidelidade (Finite World).

2 Modelo de Análise de Declividade (Slope Analysis)

Este modelo substitui a anterior lógica abstrata de resiliência por uma abordagem quantitativa baseada na inclinação local do terreno.

2.1 Cálculo de Inclinação (Percentual)

A declividade é calculada como a razão entre a diferença de altura (rise) e a distância horizontal (run), expressa em porcentagem. Para um ponto no terreno, a inclinação $S\%$ é dada por:

$$S\% = \frac{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta z)^2}}{\text{run}} \times 100$$

Onde:

- Δx e Δz são os gradientes de altura nas direções X e Z.
- A distância base (*run*) é definida pela resolução do voxel (2 unidades).

Isto permite uma correlação direta com normas técnicas de engenharia civil.

2.2 Classificação Topológica (5 Classes)

O terreno é segmentado em classes configuráveis pelo usuário. Os limiares (thresholds) padrão são:

| Classe | Intervalo ($S\%$) | Descrição |
|-----------------------------|---------------------|---|
| Flat (Plano) | 0% – 3.0% | Áreas adequadas para infraestrutura. |
| Gentle Slope (Suave) | 3.0% – 8.0% | Áreas de transição suave. |
| Rolling (Ondulado) | 8.0% – 20.0% | Terreno ondulado, requer terraplanagem. |
| Steep Slope (Íngreme/Forte) | 20.0% – 45.0% | Encostas fortes, risco de erosão. |
| Mountain (Montanha) | > 45.0% | Áreas inacessíveis ou de preservação. |

17 de Dezembro de 2025 - v3.8.4 (Finite World)

3 Modelo de Vegetação

O sistema de vegetação está atualmente em reestruturação para se adaptar ao novo modelo de terreno Finite World. O foco atual (v3.8.4) é a validação das camadas de análise topológica e pedológica.

4 Geração de Topologia (Terrain Models)

É fundamental distinguir o **Gerador de Topologia** do **Analisador de Declividade**. O sistema mantém três perfis de geração baseados em ruído Perlin, que definem a geometria física do mundo.

4.1 Modelo Experimental Blend (v3.8.3)

Este modelo introduz a composição ponderada de frequências de ruído, permitindo controle fino sobre a morfologia do terreno.

$$H(x, z) = \text{Norm} \left(\sum_{i \in \{L, M, H\}} W_i \cdot \text{Noise}(x \cdot f_i, z \cdot f_i) \right)^\gamma$$

Onde:

- W_L, W_M, W_H são os pesos para frequências Baixa, Média e Alta.
- γ é o expoente de nitidez (Sharpness).
- **Normalização:** Para evitar o achatamento (clipping) observado em versões anteriores, a soma ponderada é normalizada pelo total dos pesos ($\sum W_i$) antes de ser mapeada para a altura final.

4.2 Perfis Padrão

- **Rippled Flat:** Baixa frequência base, gera predominantemente classes *Flat* e *Gentle*.
- **Smooth Hills:** Frequência média, introduz áreas *Rolling*.
- **Rolling Hills:** Alta amplitude, necessária para gerar áreas *Steep* e *Mountain* para validação.

O fluxo de processamento é:

Modelo (Geometria) → Heightmap Grid → Slope Analysis (Classificação)

5 Configuração do Usuário

Interface atualizada no menu *Tools*:

Slope Sliders: Ajuste dos limites percentuais para cada classe.

Probe Tool: Ferramenta de diagnóstico (clique esquerdo) mostra $S\%$ exato.

5.1 Variáveis de Controle Espacial

O sistema permite o ajuste fino da topografia através de três variáveis principais:

1. **Feature Size (Frequência):** Controla o tamanho horizontal das montanhas. Valores menores geram grandes maciços; valores maiores geram colinas frequentes.
2. **Roughness (Persistência):** Controla a irregularidade da superfície.
 - Baixa (< 0.5): Colinas suaves e dunas.
 - Alta (> 0.5): Terreno rochoso, escarpado e ruidoso.
3. **Amplitude:** A altura máxima vertical em metros.
4. **Cell Size (Resolução):** A dimensão física de cada pixel da grade (em metros).

6 Modelo de Drenagem (D8 Flow)

A partir da versão v3.6.0, o sistema substituiu o modelo estocástico de erosão por partículas por um algoritmo determinístico de drenagem D8 (Steepest Descent).

6.1 Direção do Fluxo (Flow Direction)

Para cada célula do grid de terreno, o algoritmo determina a direção de escoamento para um dos 8 vizinhos com maior **declividade** descendente (Steepest Slope).

$$\text{Receiver} = \operatorname{argmax}_{n \in \text{Neighbors}} \left(\frac{H_{\text{current}} - H_n}{\text{Distance}_n} \right)$$

Onde Distance_n é a distância física até o vizinho (Resolution para cardinais, Resolution $\times \sqrt{2}$ para diagonais). Se o declive for ≤ 0 para todos os vizinhos (mínimo local), a célula é um "sink" (sumidouro).

6.2 Acumulação de Fluxo (Flow Accumulation)

O fluxo é calculado iterativamente, ordenando as células por altura (decrescente). Cada célula transfere seu valor de fluxo acumulado para o seu vizinho receptor (Receiver), simulando a conservação de massa da água.

$$F_{\text{receiver}+} = F_{\text{upstream}}$$

O resultado é um *Flux Map* onde valores altos representam rios e canais principais.

6.3 Visualização

O shader utiliza o mapa de fluxo acumulado para renderizar recursos hídricos:

- **Canais Principais:** Células com fluxo $F > 1.0$ (limite visual configurável) são coloridas em Cyan (0.0, 0.8, 1.0).
- **Continuidade:** O método D8 garante redes de drenagem dendríticas contínuas sem artefatos geométricos ("spots").

7 Análise de Bacias Hidrográficas (Watershed Analysis)

Introduzido na versão v3.6.3, este módulo permite a identificação e delimitação de bacias de drenagem baseadas na topologia D8.

7.1 Segmentação Global

O algoritmo de segmentação partitiona todo o terreno em bacias distintas. O processo ocorre em duas etapas:

1. **Identificação de Sinks:** Localização de todos os "sumidouros" (mínimos locais ou bordas do mapa). Cada sink recebe um ID único.
2. **Propagação Upstream (BFS):** Um algoritmo de busca em largura (Breadth-First Search) percorre a rede de fluxo no sentido inverso (de jusante para montante), atribuindo o ID do sink a todas as células constituintes de sua área de contribuição.

7.2 2. Delineação Interativa

Permite ao usuário consultar a bacia de contribuição de um ponto arbitrário $P(x, y)$. O sistema rastreia recursivamente todos os vizinhos que fluem para P , gerando uma máscara binária instantânea da área de captação a montante.

7.3 3. Visualização de Contornos

O usuário pode habilitar a opção "Show Contours" na interface. O sistema utiliza a derivada parcial do ID da bacia (via shader `fwidth`) para detectar arestas onde o ID muda, desenhando uma linha escura de 1 pixel sobre os limites das bacias para melhor distinção visual.

8 Métricas Eco-Hidrológicas

O Relatório Hidrológico foi expandido para incluir indicadores funcionais derivados da topografia:

8.1 Índice Topográfico de Umidade (TWI)

$$TWI = \ln \left(\frac{A}{\tan \beta} \right)$$

Onde A é a área de contribuição específica (fluxo) e $\tan \beta$ é a declividade local. O TWI estima zonas de saturação do solo. O sistema reporta a porcentagem da área com $TWI > 8.0$ como proxy para zonas úmidas.

8.2 Densidade de Drenagem (D_d)

$$D_d = \frac{L_{total}}{Area_{total}}$$

Calculado como a razão entre células classificadas como "rio"(Fluxo > 100) e o total de células. Indica a permeabilidade e dissecação do relevo.

8.3 Estatísticas por Bacia (Basin-Level Metrics)

O sistema agora agrupa métricas de elevação, declividade, TWI e densidade de drenagem individualmente para as 3 maiores bacias identificadas, permitindo uma análise comparativa da resposta hidrológica de diferentes sub-regiões do modelo.

8.4 Geração Assíncrona (v3.8.3)

A partir da versão 3.8.3, a geração de terrenos (especialmente em resoluções altas como 4096×4096) é executada de forma assíncrona em uma thread separada. Isso previne o congelamento da interface ("Not Responding") durante o processamento de milhões de células. Uma tela de carregamento informa o progresso ao usuário.

9 Resolução Espacial Variável (V3.6.5)

Para atender à necessidade de maior definição nos limites de bacias e redes de drenagem, foi introduzido o controle de **Cell Size (Resolução)**.

9.1 Definição de Escala

O usuário pode ajustar o tamanho métrico de cada célula (pixel) da grade de simulação:

- **1.0 m (Padrão):** Equilíbrio entre cobertura de área e detalhe.
- **< 1.0 m (Alta Resolução):** Aumenta a densidade de vértices por unidade de área. Ideal para suavizar limites de bacias e detalhar canais de drenagem, reduzindo o efeito de "pixelização"(aliasing geométrico).
- **> 1.0 m (Baixa Resolução):** Permite cobrir grandes extents geográficos com menor custo computacional.

O sistema ajusta automaticamente a visualização e a lógica de interação (raycasting) para manter a coerência espacial independentemente da escala escolhida.

10 Módulo de Análise de Solos (V3.7.3)

O sistema inclui agora uma camada de pedologia probabilística baseada na declividade, conforme a tabela de relação Relevo-Solo definida pelo usuário.

10.1 Metodologia: Ruído Coerente e Métricas de Paisagem (v3.8.0).

10.2 Minimap e Navegação Interativa

A versão 3.8.0 introduz um Minimap e controles de câmera aprimorados para facilitar a navegação e a compreensão espacial.

- **Visualização Top-Down:** Renderiza o mapa de solos e relevo com neblina de guerra (Fog of War) simulada pela distância.
- **Símbolos (Alegorias):** Um algoritmo de detecção de picos identifica máximos locais na topografia e desenha pequenos triângulos brancos, fornecendo referências visuais "game-like" para orientação.
- **Nível da Água (Water Level):** Visualização configurável de zonas submersas (Azul), permitindo identificar depressões e lagos mesmo antes da simulação hidrológica.
- **Controles:**
 - **Zoom:** Roda do mouse ajusta o Campo de Visão (FOV) no modo voo livre.
 - **Minimap Zoom/Pan:** Roda do mouse e botão do meio dentro da janela do minimapa.
 - **Teleporte:** Clique com botão esquerdo no minimapa para viagem rápida.

Para reproduzir os padrões espaciais descritos pelos índices de Ecologia da Paisagem (LSI, CF, RCC), o sistema substituiu a distribuição aleatória simples por um algoritmo de **Competição de Padrões** baseado em ruído procedural (Perlin/Simplex).

Cada tipo de solo possui um "perfil de ruído" configurado para mimetizar suas métricas (Ver Tabela 1):

- **Domain Warping (Distorção):** Simula o LSI. Solos com alto LSI sofrem forte distorção de coordenadas, criando bordas complexas.
- **Frequência e Rugosidade:** Simulam o CF. Solos com alto CF utilizam mais oitavas de ruído fractal.
- **Anisotropia (Estiramento):** Simula o RCC. Solos com baixo RCC são esticados em um eixo para criar formas alongadas.

O solo final em cada pixel é determinado por uma competição onde o tipo com maior "força" de padrão local vence (entre os candidatos válidos para a declividade).

10.3 Classes e Cores

- **Plano (0-3%):** Hidromórfico (Teal), B Textural (Laranja), Argila Expansiva (Roxo).
- **Suave (3-8%):** B Textural, Bem Desenvolvido (Terracota), Argila Expansiva.
- **Ondulado (8-20%):** B Textural, Argila Expansiva.
- **Forte (20-45%):** B Textural, Solo Raso (Amarelo).
- **Montanhoso (45-75%):** Solo Raso (Amarelo).
- **Escargado (> 75%):** Afloramento Rochoso (Cinza).

Tabela 1: Descritores de estrutura espacial das manchas de solo segundo métricas da Ecologia da Paisagem (Farina)

| Tipo de Solo | LSI | CF | RCC |
|---------------------|------------|-----------|------------|
| Solo Raso | 5434.91 | 2.49 | 0.66 |
| Bem Desenvolvido | 2508.07 | 2.36 | 0.68 |
| Hidromórfico | 3272.30 | 2.27 | 0.65 |
| Argila Expansiva | 1827.24 | 2.84 | 0.64 |
| B-Textural | 2766.09 | 3.36 | 0.66 |

Nota: LSI = Índice de Forma da Paisagem (*Landscape Shape Index*), indicador da complexidade geométrica média das manchas; CF = Complexidade da Forma, expressando irregularidade e alongamento das manchas; RCC = Coeficiente de Circularidade Relativa, variando de 0 (formas alongadas ou irregulares) a 1 (formas altamente compactas).

Descritores de forma das manchas

A estrutura espacial das manchas de solo foi caracterizada por descritores clássicos da Ecologia da Paisagem, conforme proposto por Farina (1998, 2006), os quais permitem avaliar a complexidade geométrica, a irregularidade das bordas e o grau de compactação das manchas na paisagem. Foram utilizados o Índice de Forma da Paisagem (LSI), a Complexidade da Forma (CF) e o Coeficiente de Circularidade Relativa (RCC), descritos a seguir.

Índice de Forma da Paisagem (LSI) O LSI expressa a complexidade geométrica das manchas a partir da relação entre perímetro e área, sendo definido por:

$$LSI = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

em que P corresponde ao perímetro da mancha e A à sua área. Valores de LSI próximos de 1 indicam manchas com formas simples e compactas, enquanto valores mais elevados refletem maior irregularidade e desenvolvimento de bordas.

Complexidade da Forma (CF) A Complexidade da Forma representa o grau de irregularidade geométrica das manchas, considerando o aumento relativo do perímetro em relação à área:

$$CF = \frac{P}{A}$$

em que P é o perímetro e A a área da mancha. Valores mais elevados de CF indicam formas mais alongadas, recortadas ou dendríticas.

Coeficiente de Circularidade Relativa (RCC) O Coeficiente de Circularidade Relativa avalia o quanto próxima a forma da mancha está de um círculo perfeito, sendo calculado por:

$$RCC = \frac{4\pi A}{P^2}$$

em que A corresponde à área da mancha e P ao seu perímetro. O RCC varia entre 0 e 1, sendo valores próximos de 1 indicativos de manchas altamente compactas e valores menores associados a formas alongadas ou fragmentadas.