

SisterApp: Plataforma de Ecologia Computacional v3.8.4

Manual Técnico de Modelos Computacionais

José Pedro Trindade

18 de dezembro de 2025

Conteúdo

| | | |
|----------|--|----------|
| 1 | Introdução | 3 |
| 2 | Modelo de Análise de Declividade (Slope Analysis) | 3 |
| 2.1 | Cálculo de Inclinação (Percentual) | 3 |
| 2.2 | Classificação Topológica (5 Classes) | 3 |
| 3 | Modelo de Vegetação Campestre (Grassland Model) | 3 |
| 3.1 | Estrutura de Dois Estratos (DDD) | 4 |
| 3.2 | Definição de Escala e Resolução | 4 |
| 3.2.1 | Resolução Física (R) | 4 |
| 3.2.2 | Interpretação da Cobertura | 4 |
| 3.2.3 | Definição de Vigor (ϕ) | 4 |
| 3.3 | Definição Operacional do Distúrbio | 5 |
| 3.4 | Resposta Funcional ao Distúrbio | 5 |
| 3.4.1 | Estrato Inferior (EI - Gramíneas) | 5 |
| 3.4.2 | Estrato Superior (ES - Arbustos) | 5 |
| 3.5 | Modulação da Capacidade de Suporte | 5 |
| 3.6 | Heterogeneidade Espacial (Spatial Noise) | 6 |
| 3.7 | Visualização em Tempo Real | 6 |
| 3.8 | Inovações de Visualização Científica (Roadmap) | 6 |
| 3.8.1 | Síntese de NDVI Virtual | 6 |
| 3.8.2 | Sinalização de Estresse (Early Warning) | 6 |
| 3.9 | Formulação Matemática Detalhada | 6 |
| 3.9.1 | Dinâmica de Crescimento e Recuperação | 7 |
| 3.9.2 | Probabilidade de Fogo (Fire Probability) | 7 |
| 3.9.3 | Dinâmica de Pastejo | 7 |
| 3.9.4 | Implementação Computacional | 8 |
| 4 | Geração de Topologia (Terrain Models) | 8 |
| 4.1 | Modelo Experimental Blend (v3.8.3) | 8 |
| 4.2 | Perfis Padrão | 8 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 5 | Configuração do Usuário | 9 |
| 5.1 | Variáveis de Controle Espacial | 9 |
| 6 | Modelo de Drenagem (D8 Flow) | 9 |
| 6.1 | Direção do Fluxo (Flow Direction) | 9 |
| 6.2 | Acumulação de Fluxo (Flow Accumulation) | 9 |
| 6.3 | Visualização | 10 |
| 7 | Análise de Bacias Hidrográficas (Watershed Analysis) | 10 |
| 7.1 | Segmentação Global | 10 |
| 7.2 | 2. Delineação Interativa | 10 |
| 7.3 | 3. Visualização de Contornos | 10 |
| 8 | Métricas Eco-Hidrológicas | 10 |
| 8.1 | Índice Topográfico de Umidade (TWI) | 11 |
| 8.2 | Densidade de Drenagem (D_d) | 11 |
| 8.3 | Estatísticas por Bacia (Basin-Level Metrics) | 11 |
| 8.4 | Geração Assíncrona (v3.8.3) | 11 |
| 9 | Resolução Espacial Variável (V3.6.5) | 11 |
| 9.1 | Definição de Escala | 11 |
| 10 | Módulo de Análise de Solos (V3.7.3) | 12 |
| 10.1 | Metodologia: Ruído Coerente e Métricas de Paisagem (v3.8.0). | 12 |
| 10.2 | Minimap e Navegação Interativa | 12 |
| 10.3 | Classes e Cores | 13 |

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 Campestre (Grassland Model)

O SisterApp v3.9.1 introduz um modelo de dinâmica de vegetação campestre baseado em princípios de ecologia espacial e regimes de distúrbio (Fogo e Pastejo). Devido à complexidade biológica, este módulo possui uma ****Documentação de Domínio (DDD) Exclusiva**** que define suas regras e invariantes.

3.1 Estrutura de Dois Estratos (DDD)

A vegetação é modelada como dois estratos competitivos em cada célula do grid ($1m^2$):

- **Estrato Inferior (EI):** Gramíneas e herbáceas. Alta taxa de crescimento, alta resiliência ao pastejo.
- **Estrato Superior (ES):** Subarbustos e arbustos baixos (geralmente $< 1m$). Crescimento lento e não pastejado. Apesar do porte baixo, acumula biomassa lenhosa que, quando senescente, atua como combustível principal.

O estado de cada célula é definido por um vetor de 4 componentes:

$$V_{cell} = \{Coverage_{EI}, Coverage_{ES}, Vigor_{EI}, Vigor_{ES}\}$$

3.2 Definição de Escala e Resolução

A célula (V_{cell}) é a unidade atômica da simulação, representando um estado homogêneo estatístico. Embora a simulação opere em espaço de grade abstrato (Grid Space), a interpretação física da "Cobertura" (C) é dependente da resolução métrica configurada na interface:

3.2.1 Resolução Física (R)

A dimensão espacial da célula é definida pelo parâmetro **Cell Size (Resolution)**, acessível na interface do usuário sob o menu "Map Generator". Este parâmetro permite o ajuste dinâmico em tempo de execução de $R \in [0.1m, 4.0m]$. O valor padrão é $R = 1.0m$. A área física de uma célula é dada por $A_{cell} = R^2$.

3.2.2 Interpretação da Cobertura

O valor de cobertura $C \in [0, 1]$ representa a fração da área da célula ocupada pelo estrato:

$$\text{Área Ocupada}(m^2) = C \cdot R^2$$

Exemplos:

- Para $R = 1.0m$ (Padrão): $C = 0.5$ implica $0.5m^2$ de biomassa.
- Para $R = 0.5m$ (Alta Definição): A área total é $0.25m^2$, logo $C = 0.5$ implica $0.125m^2$.

Esta abstração permite que o modelo seja agnóstico à escala (Scale-Independent) em sua lógica interna, enquanto a renderização adapta a densidade visual à geometria física.

3.2.3 Definição de Vigor (ϕ)

O Vigor ($\phi \in [0, 1]$) não representa biomassa, mas sim o **estado fisiológico** da planta.

- $\phi \approx 1.0$: Turgor máximo, alta clorofila, baixo estresse hídrico. (Visual: Verde)
- $\phi < 0.5$: Senescência ou estresse severo. (Visual: Amarelo/Marrom)
- $\phi = 0.0$: Planta morta (Necromassa em pé).

Diferente de modelos estáticos, o Vigor no SisterApp é dinâmico e espacialmente heterogêneo:

$$\phi_{target}(x, y) = 0.8 + 0.2 \cdot \text{Noise}(x, y)$$

A vegetação busca constantemente esse alvo, simulando microclimas variados. Se perturbada (ex: pisoteio ou seca não simulada explicitamente), o vigor decai, aumentando a probabilidade de fogo (\mathcal{F}) antes mesmo da perda de cobertura.

3.3 Definição Operacional do Distúrbio

O distúrbio (D) é definido como uma variável escalar composta que integra três dimensões fundamentais:

- **Magnitude** (M): intensidade do evento;
- **Frequência Ecológica** (F): probabilidade relativa do regime (0.1 = Raro, 0.9 = Crônico);
- **Escala Espacial** (E): proporção da paisagem afetada.

$$D = M \cdot F \cdot E$$

3.4 Resposta Funcional ao Distúrbio

O sistema modela a capacidade de suporte (K) de cada estrato como uma função direta do regime de distúrbio vigente:

3.4.1 Estrato Inferior (EI - Gramíneas)

Apresenta resposta **logarítmica positiva**:

$$R_{EI}(D) = \text{clamp}(\log(1 + \alpha D), 0, 1)$$

Onde α é o coeficiente de sensibilidade (Ganho). Ecologicamente, isso expressa que distúrbios de baixa intensidade já promovem forte resposta do EI, saturando em regimes intensos.

3.4.2 Estrato Superior (ES - Arbustos)

Apresenta resposta **exponencial negativa**:

$$R_{ES}(D) = \text{clamp}(e^{-\beta D}, 0, 1)$$

Onde β é o coeficiente de decaimento. Isso captura a supressão acelerada de lenhosas sob regimes de perturbação frequente.

3.5 Modulação da Capacidade de Suporte

Ao contrário do modelo anterior de remoção direta, os índices R_{EI} e R_{ES} modulam os alvos de equilíbrio:

$$K_{EI}^{target} \propto R_{EI}(D) \quad \text{e} \quad K_{ES}^{target} \propto R_{ES}(D)$$

A vegetação então "relaxa" em direção a esses alvos ao longo do tempo (τ_{rec}), permitindo transições suaves entre estados de savana, campo limpo e arbustal.

3.6 Heterogeneidade Espacial (Spatial Noise)

Para evitar a monotonia visual e simular a variabilidade edáfica não mapeada, a inicialização e a capacidade de suporte local (K) são moduladas por funções de ruído procedural (Perlin Noise). Isso gera manchas naturais de alta e baixa densidade, independentemente dos distúrbios.

3.7 Visualização em Tempo Real

O shader de terreno foi atualizado para combinar a coloração do solo (Pedologia) com a camada de vegetação.

- **Realistic Mode:** Mistura texturas de solo e vegetação baseada na cobertura. O Vigor modula a cor entre Verde (Saudável) e Amarelo/Marrom (Senescente).
- **Heatmaps:** Modos de diagnóstico para visualizar cobertura bruta de EI/ES e níveis de estresse fisiológico (Vigor).

3.8 Inovações de Visualização Científica (Roadmap)

Para aumentar a fidelidade ontológica da plataforma, foram definidos conceitos avançados de tradução visual (DDD Visual):

3.8.1 Síntese de NDVI Virtual

Para validação cruzada com sensoriamento remoto, o sistema prevê a geração de "Falso-Cor" baseada na reflectância espectral simulada:

$$NDVI_{sim} = \frac{(C_{total} \cdot Vigor) - (1 - Vigor)}{(C_{total} \cdot Vigor) + (1 - Vigor)}$$

Isso permite comparar diretamente os output do modelo com imagens Sentinel-2 ou Landsat.

3.8.2 Sinalização de Estresse (Early Warning)

Diferente de engines de jogos que apenas "removem" a planta morta, o SisterApp implementa a **Atenuação Visual**: plantas sob estresse hídrico ou de pastejo manifestam redução de turgor (suavização de normal map) e transparência antes da perda efetiva de biomassa.

3.9 Formulação Matemática Detalhada

O modelo utiliza uma abordagem híbrida de Autômatos Celulares e Equações Diferenciais Discretas. O estado de cada célula i no tempo t é vetorizado como:

$$\mathbf{V}_i(t) = [C_{EI}, C_{ES}, \phi_{EI}, \phi_{ES}, \tau_{rec}]$$

Onde C é a cobertura (0-1), ϕ é o vigor fisiológico (0-1) e τ_{rec} é o temporizador de recuperação pós-distúrbio.

3.9.1 Dinâmica de Crescimento e Recuperação

Quando $\tau_{rec} \leq 0$, a vegetação recupera biomassa seguindo uma função logística linearizada próxima à capacidade de suporte K :

$$\frac{dC_{EI}}{dt} = r_{EI} \cdot (K_{EI} - C_{EI}) \cdot \phi_{EI}$$

Implementado numericamente como:

```
if (grid.ei_coverage[i] < maxEI) {
    grid.ei_coverage[i] += 0.1f * dt; // Taxa r = 0.1
    if (grid.ei_coverage[i] > maxEI) grid.ei_coverage[i] = maxEI;
}
```

A colonização por arbustos (C_{ES}) é dependente da presença prévia de gramíneas ($C_{EI} > 0.8$), simulando a sucessão secundária facilitada.

3.9.2 Probabilidade de Fogo (Fire Probability)

A ignição estocástica é calculada localmente com base na inflamabilidade do combustível disponível. O modelo adota a premissa ecológica de que **arbustos secos** (ES_{dry}) são o principal vetor de propagação:

1. **Fator de Secura (δ_{ES}):**

$$\delta_{ES} = \max(0, 1.0 - \phi_{ES})$$

2. **Inflamabilidade (\mathcal{F}_i):**

$$\mathcal{F}_i = \underbrace{C_{ES} \cdot (2\delta_{ES})}_{\text{Lenhoso Seco}} + \underbrace{C_{EI} \cdot 0.3 \cdot (1 - \phi_{EI})}_{\text{Fino Morto}}$$

*Nota: A contribuição do ES é nula se $\delta_{ES} < 0.5$ (Vigor > 0.5).

3. **Probabilidade de Ignição (P_{ign}):**

$$P_{ign} = P_{base} + \alpha \cdot \mathcal{F}_i$$

Onde $P_{base} = 0.05$ e $\alpha = 0.8$. Se um número aleatório $R \in [0, 1] < P_{ign}$, ocorre a remoção total de biomassa.

3.9.3 Dinâmica de Pastejo

O pastejo atua como uma força de remoção seletiva sobre o Estrato Inferior:

$$C_{EI}(t + \Delta t) = C_{EI}(t) - I_{grazing} \cdot \Delta t$$

Com impacto colateral no vigor:

$$\phi_{EI}(t + \Delta t) = \phi_{EI}(t) - \frac{I_{grazing}}{2} \cdot \Delta t$$

Isso simula o "superpastejo" que reduz não apenas a biomassa, mas a capacidade fotos-sintética futura.

3.9.4 Implementação Computacional

Para garantir a escalabilidade em grandes paisagens (> 16 milhões de células), o sistema adota uma abordagem de *Fixed-Time Step Simulation*:

- **Frequency:** 5-10 Hz (desacoplado do Frame Rate de renderização).
- **Throttling:** A atualização de estado e a transferência de dados (CPU \rightarrow GPU) são limitadas temporalmente para evitar gargalos no barramento PCIe.

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) \rightarrow Heightmap Grid \rightarrow 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 cardeais, $\text{Resolution} \times \sqrt{2}$ 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 (decrecente). 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 particiona 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 agrega 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 extensões geográficas 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 Minimapa e Navegação Interativa

A versão 3.8.0 introduz um Minimapa 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.
 - **Minimapa 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 (dentre 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).
- **Escarpado (> 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 quão 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.