

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 ($C_{EI} > 0.7$), simulando a sucessão secundária facilitada.

Determinismo e Estocasticidade Para garantir a reprodutibilidade científica dos experimentos, a geração de números aleatórios para eventos estocásticos utiliza um gerador **Mersenne Twister** (std::mt19937) com semente fixa, eliminando a variabilidade não-controlada entre execuções.

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 fotosintética 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.

11 Modelo Integrado Ecofuncional da Paisagem (v4.0)

Com a atualização v4.0 (Dezembro/2025), o SisterApp transcende a simulação isolada de vegetação para incorporar um Modelo Integrado de Paisagem (Integrated Landscape Model - ILM), atendendo aos requisitos de acoplamento ecofuncional.

11.1 Arquitetura de Sistemas Integrados

O modelo adota uma arquitetura em camadas interconectadas, onde processos físicos (Hidrologia, Pedogênese) e biológicos (Crescimento Vegetal) operam em feedback contínuo.

11.1.1 Fundação Edáfica (Soil System)

Implementado como um *SoilGrid* (SoA), o sistema de solo introduz propriedades dinâmicas e funcionais para cada célula:

- **Profundidade do Solo (d_{soil}):** Variável de estado crítica, sujeita a erosão e intemperismo. Solos rasos ($d < 0.2m$) limitam severamente o Vigor vegetal.
- **Banco de Propágulos (II):** Representa a *Memória Ecológica*. A capacidade de regeneração (τ_{rec}) depende da integridade deste banco. Erosão severa remove o banco, levando à desertificação irreversível.
- **Matéria Orgânica (OM):** Acumulada pela biomassa vegetal, aumenta a capacidade de infiltração e suporte.

11.1.2 Hidrologia Dinâmica (Hydro System)

Diferente da abordagem estática anterior (apenas visualização de drenagem), o novo *HydroGrid* simula fluxo de água ativo a cada passo de tempo:

$$Q_{runoff} = \max(0, P_{rain} - I_{infil})$$

Onde a Infiltração (I_{infil}) é modulada pela cobertura vegetal: $I_{infil} = K_{sat} \cdot (1 + \beta \cdot C_{veg})$. Cobertura densa aumenta a infiltração em até 3x, reduzindo o escoamento superficial.

11.1.3 Erosão e Sedimentação

O risco de erosão (E_{risk}) é calculado pelo poder de fluxo de água (Stream Power) ponderado pela proteção vegetal:

$$E_{risk} = Q_{runoff} \cdot S_{lope} \cdot (1 - C_{veg})$$

Se E_{risk} excede um limiar crítico, ocorre remoção de d_{soil} . Este feedback negativo (Perda de Cobertura \rightarrow Erosão \rightarrow Perda de Solo \rightarrow Menor Capacidade de Suporte) é o mecanismo central de degradação da paisagem.

11.2 Acoplamento Solo-Planta-Água

A vegetação agora responde ativamente ao estado da paisagem:

1. **Site Quality:** A Capacidade de Suporte (K_{EI}, K_{ES}) é multiplicada pelo Índice de Qualidade do Solo ($SQ = d_{soil} \cdot OM$).
2. **Estresse Hídrico:** O Vigor (ϕ) decai se o solo estiver saturado (Runoff excessivo) ou muito raso (incapaz de reter água).
3. **Resiliência:** A taxa de recuperação pós-distúrbio é limitada pela disponibilidade de propágulos local e vizinha.