

# SisterApp: Plataforma de Ecologia Computacional v3.8.4

## Manual Técnico de Modelos Computacionais

José Pedro Trindade

18 de dezembro de 2025

## Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Modelo de Análise de Declividade (Slope Analysis)</b>	<b>3</b>
2.1	Cálculo de Inclinação (Percentual) . . . . .	3
2.2	Classificação Topológica (5 Classes) . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Modelo de Vegetação Campeste (Grassland Model)</b>	<b>3</b>
3.1	Estrutura de Dois Estratos (DDD) . . . . .	4
3.2	Dinâmica de Distúrbios . . . . .	4
3.2.1	Fogo (Fire) . . . . .	4
3.2.2	Pastejo (Grazing) . . . . .	4
3.3	Heterogeneidade Espacial (Spatial Noise) . . . . .	4
3.4	Visualização em Tempo Real . . . . .	4
3.5	Inovações de Visualização Científica (Roadmap) . . . . .	5
3.5.1	Síntese de NDVI Virtual . . . . .	5
3.5.2	Sinalização de Estresse (Early Warning) . . . . .	5
3.6	Formulação Matemática Detalhada . . . . .	5
3.6.1	Dinâmica de Crescimento e Recuperação . . . . .	5
3.6.2	Probabilidade de Fogo (Fire Probability) . . . . .	6
3.6.3	Dinâmica de Pastejo . . . . .	6
3.6.4	Implementação Computacional . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Geração de Topologia (Terrain Models)</b>	<b>6</b>
4.1	Modelo Experimental Blend (v3.8.3) . . . . .	7
4.2	Perfis Padrão . . . . .	7
<b>5</b>	<b>Configuração do Usuário</b>	<b>7</b>
5.1	Variáveis de Controle Espacial . . . . .	7
<b>6</b>	<b>Modelo de Drenagem (D8 Flow)</b>	<b>8</b>
6.1	Direção do Fluxo (Flow Direction) . . . . .	8
6.2	Acumulação de Fluxo (Flow Accumulation) . . . . .	8
6.3	Visualização . . . . .	8

<b>7</b>	<b>Análise de Bacias Hidrográficas (Watershed Analysis)</b>	<b>8</b>
7.1	Segmentação Global . . . . .	8
7.2	2. Delineação Interativa . . . . .	9
7.3	3. Visualização de Contornos . . . . .	9
<b>8</b>	<b>Métricas Eco-Hidrológicas</b>	<b>9</b>
8.1	Índice Topográfico de Umidade (TWI) . . . . .	9
8.2	Densidade de Drenagem ( $D_d$ ) . . . . .	9
8.3	Estatísticas por Bacia (Basin-Level Metrics) . . . . .	9
8.4	Geração Assíncrona (v3.8.3) . . . . .	10
<b>9</b>	<b>Resolução Espacial Variável (V3.6.5)</b>	<b>10</b>
9.1	Definição de Escala . . . . .	10
<b>10</b>	<b>Módulo de Análise de Solos (V3.7.3)</b>	<b>10</b>
10.1	Metodologia: Ruído Coerente e Métricas de Paisagem (v3.8.0). . . . .	10
10.2	Minimap e Navegação Interativa . . . . .	10
10.3	Classes e Cores . . . . .	11

# 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:

- $\Delta x$  e  $\Delta z$  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 Dinâmica de Distúrbios

O modelo implementa dois agentes principais de perturbação:

#### 3.2.1 Fogo (Fire)

Ocorrência estocástica baseada em probabilidade  $P_{fire}$  e biomassa disponível.

- **Efeito:** Remoção total de cobertura ( $Coverage \rightarrow 0$ ) em ambos os estratos.
- **Recuperação:** O sistema inicia um contador de "Recovery Time". A recolonização ocorre via nucleação a partir de vizinhos ou banco de sementes (simulado por ruído de base).

#### 3.2.2 Pastejo (Grazing)

Pressão constante e seletiva sobre o estrato inferior (Gramíneas).

- **Efeito:** Redução linear da cobertura do EI proporcional à intensidade ( $I_{grazing}$ ).
- **Consequência:** A redução do EI libera espaço e recursos, podendo facilitar a invasão arbustiva (emcasting encroachment) em escalas temporais longas (não simulado em tempo real nesta versão).

### 3.3 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.

### 3.4 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).

## 3.5 Inovações de Visualização Científica (Roadmap)

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

### 3.5.1 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.

### 3.5.2 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.

## 3.6 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),  $\phi$  é o vigor fisiológico (0-1) e  $\tau_{rec}$  é o temporizador de recuperação pós-distúrbio.

### 3.6.1 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.

### 3.6.2 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 ( $\delta_{ES}$ ):\*\*

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

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.

### 3.6.3 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.

### 3.6.4 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 → 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.
- $\gamma$  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  $\text{Distance}_n$  é a distância física até o vizinho (Resolution para cardinais,  $\text{Resolution} \times \sqrt{2}$  para diagonais). Se o declive for  $\leq 0$  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 particiona todo o terreno em bacias distintas. O processo ocorre em duas etapas:

1. **Identificação de Sinks:** Localização de todos os "sumidouros"(minimos 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  $4096 \times 4096$ ) 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).
- **Escarpado (> 75%):** Afloramento Rochoso (Cinza).

### 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.

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

<b>Tipo de Solo</b>	<b>LSI</b>	<b>CF</b>	<b>RCC</b>
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).

**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.