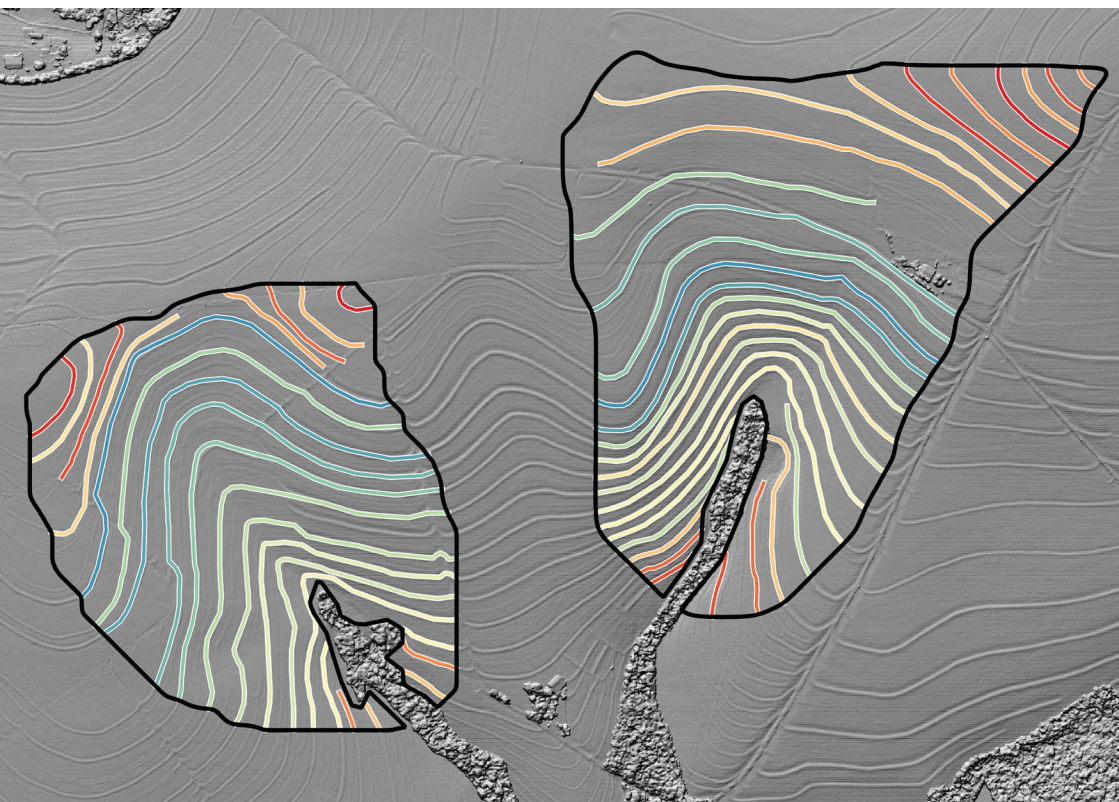


Documentos

Londrina, PR / Março 2026

Diagnóstico funcional do desempenho hidrológico de sistemas de terraceamento em bacias hidrográficas



***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Soja
Ministério da Agricultura e Pecuária***

e-ISSN 2176-2937

Documentos 483

Março, 2026

Diagnóstico funcional do desempenho hidrológico de sistemas de terraceamento em bacias hidrográficas

*Julio Cezar Franchini
Alvadi Antonio Balbinot Junior
Luís Carlos Hernani
Hudson Carlos Lissoni Leonardo
Henrique Debiasi
Esmael Lopes do Santos
Ana Carolina Vilela Diniz
Ana Julia Brambilla*

***Embrapa Soja
Londrina, PR
2026***

Embrapa Soja

Rod. Carlos João Strass, s/n
Acesso Orlando Amaral,
Caixa Postal 4006, CEP 86085981
Distrito da Warta, Londrina, PR
(43) 3371 6000
www.embrapa.br/soja
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente: *Roberta Aparecida Carnevalli*

Secretária-executiva: *Regina Maria Villas Bôas
de Campos Leite*

Membros: *Adônis Moreira, Clara Beatriz
Hoffmann-Campo, Claudine Dinali Santos
Seixas, Claudio Guilherme Portela de Carvalho,
Fernando Augusto Henning, Leandro Eugênio
Cardamone Diniz, Liliane Márcia Mertz-
Henning, Maria Cristina Neves de Oliveira*

Edição executiva

Vanessa Fuzinatto Dall'Agnol

Revisão de texto

Regina Maria Villas Bôas de Campos Leite

Normalização

Valéria de Fátima Cardoso (CRB-9/1188)

Projeto gráfico

Leandro Sousa Fazio

Diagramação

Vanessa Fuzinatto Dall'Agnol

Foto da capa

*Julio Cezar Franchini. Imagem produzida
com resultados do trabalho a partir de
imagens de drone*

Publicação digital: PDF

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Soja

Diagnóstico funcional do desempenho hidrológico de sistemas de terraceamento
em bacias hidrográficas / Julio Cezar Franchini... [et al.]. – Londrina : Embrapa
Soja, 2026.

76 p. (Documentos / Embrapa Soja, ISSN 2176-2937 ; n. 483).

1. Terraceamento. 2. Bacia hidrográfica. I. Franchini, Julio Cezar. II. Balbinot Junior,
Alvadi Antonio. III. Hernani, Luís Carlos. IV. Leonardo, Hudson Carlos Lissoni. V.
Debiasi, Henrique. VI. Santos, Esmael Lopes do. VII. Diniz, Ana Carolina Vilela. VIII.
Brambilla, Ana Julia. VI. Série.

CDD 631.455 (21. ed.)

Autores

Julio Cezar Franchini

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR.

Alvadi Antonio Balbinot Junior

Engenheiro-agrônomo, doutor em Produção Vegetal, pesquisador da Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS.

Luis Carlos Hernani

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ.

Hudson Carlos Lissoni Leonardo

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, engenheiro-sênior III da Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu, PR.

Henrique Debiasi

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências do Solo, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR.

Esmael Lopes do Santos

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, professor do Centro Universitário Assis Gurgacz (FAG), Cascavel, PR.

Ana Carolina Vilela Diniz

Engenheira-agrônoma, bolsista de inovação projeto AISA/FAPED, Londrina, PR.

Ana Julia Brambilla

Estudante de Agronomia do Centro Universitário Filadélfia, bolsista de iniciação científica do projeto Soja Baixo Carbono/FAPED, Londrina, PR.

Sumário

Introdução	7
Contribuições do estudo	11
Fundamentos conceituais	13
Funcionamento hidrológico do sistema de terraceamento	13
Capacidade de Armazenamento (CA) como atributo estrutural	14
Lâmina de Escoamento Superficial (LES) e resposta hidrológica	14
Capacidade Estrutural Relativa (CER)	15
Margem estrutural (σ) e conceito de condição marginal	15
Moduladores morfodinâmicos do desempenho estrutural	16
Da quantificação à tipologia funcional da falha	17
Material e Métodos	19
Área de estudo e unidades de análise	19
Aquisição e processamento dos dados topográficos	20
Declividade	21
Índice de conectividade (IC)	22
Índice de Potência de Escoamento (SPI)	23
Fator comprimento e declividade da rampa (LS)	24
Estimativa da Capacidade de Armazenamento (CA)	25
Estimativa da Capacidade de Armazenamento (CA) usando dados vetoriais	25
Espacialização da Capacidade de Armazenamento (CA) usando modelagem geoestatística	28
Estimativa da Taxa de Infiltração Estável (TIE)	32
Cálculo da Lâmina de Escoamento Superficial (LES)	33
Cálculo da Capacidade Estrutural Relativa (CER)	34
Estimativa da margem estrutural (σ)	35
Classificação dos estados operacionais da CER	35
Discretização estatística para análise de associação espacial	36
Análise estatística e medidas de associação	36
Tipologia espacial dos estados operacionais	36
Síntese metodológica	37

Resultados e Discussão	37
Distribuição dos moduladores geomorfológicos	37
Declividade	38
Índice de conectividade (IC)	41
Fator LS	43
Fator SPI	44
Síntese do papel dos moduladores	46
Taxa de Infiltração Estável (TIE) e Lâmina de Escoamento Superficial (LES)	47
TIE: resposta aos cenários e contraste entre as bacias	48
Lâmina de Escoamento Superficial (LES)	49
Contraste estrutural no cenário normal e implicação para o diagnóstico	49
Distribuição espacial de TIE e LES	50
Capacidade Estrutural (CA)	51
Distribuição por quantis	52
Organização espacial da CA	53
Capacidade Estrutural Relativa	56
Distribuição contínua da CER e interpretação funcional	56
Estados operacionais da CER	58
Distribuição dos estados operacionais	59
Síntese funcional e implicações	62
Especialização dos estados operacionais da Capacidade Estrutural Relativa (CER)	62
Associação entre a intensidade da falha, CER e moduladores morfodinâmicos	65
Tipologia espacial e funcional das falhas da CER	68
Tipologia funcional dos estados operacionais da CER	69
Implicações espaciais e funcionais	70
Condição sem terraços como limite teórico de falha estrutural	71
Conclusões	72
Agradecimentos	74
Lista de siglas e símbolos	74
Referências	75

Apresentação

O aumento da frequência e da intensidade de eventos climáticos extremos, como secas e excesso de chuvas, impõe a necessidade de práticas que incrementem a infiltração, retenção e disponibilização de água às culturas, bem como minimizem as perdas de água, sedimentos, nutrientes e carbono orgânico via erosão. O Sistema Plantio Direto (SPD), quando adotado seguindo os seus fundamentos básicos: diversificação de espécies cultivadas; mínima mobilização do solo; e cobertura permanente, seja por plantas vivas ou palhada, se constitui no principal alicerce da agricultura conservacionista em clima tropical e subtropical. Contudo, dependendo das condições de solo, relevo e de chuvas, o SPD necessita de estratégias mecânicas complementares para ordenar o fluxo de água, minimizando o processo erosivo. Dentre as práticas mecânicas, destacam-se os terraços. Por milhares de anos, o terraceamento tem sido um dos sistemas mais importantes para prevenir a erosão do solo, conservar a água e aumentar a produtividade das culturas.

A adequada instalação e a manutenção do sistema de terraceamento é fundamental para manter a sua funcionalidade em nível de bacia. O diagnóstico da funcionalidade dos terraços é um desafio pouco trivial, uma vez que depende de uma série de fatores ligados ao solo, ao relevo, à chuva e ao próprio terraço. O presente trabalho apresenta uma abordagem inovadora sobre a análise da funcionalidade do conjunto de terraços presente em duas bacias hidrográficas localizadas no Oeste do Paraná, utilizando geotecnologias modernas, atualmente disponíveis aos usuários.

A metodologia adotada mostrou-se eficaz para a verificação do desempenho e dos riscos hidrológicos dos sistemas de terraços implantados nas duas bacias, subsidiando tomadas de decisão sobre a necessidade ou não de adequações no manejo do solo e/ou nos terraços. A área de estudo representa condições edáficas e de uso agrícola semelhantes às de, aproximadamente, dois milhões de hectares no Paraná, o que reforça o potencial de replicação da metodologia em larga escala.

Roberta Aparecida Carnevalli

Gerente-adjunta de Pesquisa e Desenvolvimento

Introdução

O terraceamento agrícola é uma das principais práticas estruturais de conservação do solo e da água em áreas agrícolas, sendo amplamente reconhecido por sua capacidade de reduzir o comprimento efetivo de rampa, controlar o escoamento superficial, aumentar a infiltração de água no solo e minimizar as perdas por erosão hídrica. Quando adequadamente dimensionado, implantado e mantido, o sistema de terraços desempenha papel central na estabilidade hidrológica e na conservação dos recursos edáficos, conforme descrito na literatura clássica de engenharia de conservação do solo e da água (Morgan, 2005).

Apesar de sua ampla adoção, avaliações de campo e estudos recentes têm demonstrado que uma parcela expressiva dos sistemas de terraceamento em operação apresenta desempenho inferior ao esperado, com recorrência de falhas hidráulicas, rompimentos localizados e geração de escoamento superficial excedente (Herweg; Ludi, 1999; Nyssen et al., 2010; Mekonnen et al., 2017). Tradicionalmente, a avaliação da eficiência dessas estruturas tem sido baseada predominantemente em critérios geométricos e representações estruturais estáticas, os quais capturam a conectividade potencial da paisagem, mas não sua ativação funcional (Heckmann et al., 2018; Keesstra et al., 2018). Embora fundamentais na fase de projeto, esses critérios são insuficientes para explicar o desempenho hidráulico real do sistema em operação. A conectividade hidrológica é dinâmica e episódica, controlada por limiares e modulada por processos como degradação estrutural, compactação do solo, variabilidade espacial da infiltração e pela morfologia do relevo, que condiciona a geração e a concentração do fluxo (Baartman et al., 2013; Poepl et al., 2017; Masselink et al., 2017; Dwivedi et al., 2025).

Avanços recentes na literatura têm destacado que o desempenho hidrológico de estruturas de conservação não depende apenas de sua geometria, mas do balanço funcional entre a capacidade de armazenamento disponível e a geração efetiva de escoamento

superficial, cuja ativação é controlada por limiares hidrológicos e pela dinâmica da conectividade (Borselli et al., 2008; Masselink et al., 2017; Heckmann et al., 2018). Esse desempenho é influenciado simultaneamente pelo manejo do solo (Herweg; Ludi, 1999; Nyssen et al., 2010) e pela organização geomorfológica da paisagem, que modula a conectividade estrutural e funcional (Baartman et al., 2013; Cavalli et al., 2013; Poepl et al., 2017). Nesse contexto, conceitos como limiares hidrológicos (Castillo et al., 2003), conectividade do escoamento (Dwivedi et al., 2025; Borselli et al., 2008) e conectividade hidrossedimentológica (Heckmann et al., 2018; Cavalli et al., 2013; Mekonnen et al., 2017) passaram a ser incorporados às análises em escala de encosta e bacia hidrográfica.

Índices morfodinâmicos como a declividade, o fator de integração do comprimento de rampa e declividade (LS), o índice de potência do escoamento (SPI) e o índice de conectividade (IC) têm sido amplamente utilizados para representar esses controles (Borselli et al., 2008; Cavalli et al., 2013; Baartman et al., 2013). Porém, em grande parte dos estudos são analisados de forma isolada ou desvinculados do desempenho estrutural efetivo das práticas de conservação (Heckmann et al., 2018; Keesstra et al., 2018). Além disso, permanece uma lacuna importante na literatura no que se refere à integração funcional entre a infraestrutura instalada e a resposta hidrológica do sistema, uma vez que a conectividade estrutural não representa necessariamente a conectividade funcional ativada sob diferentes regimes de evento (Masselink et al., 2017; Dwivedi et al., 2025). Em particular, a maioria das abordagens adota classificações dicotômicas (falha *versus* não falha) ou utiliza limiares fixos e generalizados, sem considerar que a margem estrutural de segurança varia em função da morfologia da bacia, da organização espacial dos terraços, do tipo de solo e do histórico de degradação do sistema (Castillo et al., 2003; Heckmann et al., 2018; Mekonnen et al., 2017).

Nesse contexto, torna-se necessário avançar de uma avaliação meramente geométrica para uma abordagem funcional, capaz de integrar explicitamente a infraestrutura instalada com a resposta hidrológica efetiva do sistema (Heckmann et al., 2018; Masselink et al.,

2017). Essa mudança de perspectiva é especialmente relevante em cenários de intensificação do uso do solo, aumento da frequência de eventos extremos de precipitação (Heckmann et al., 2018; Masselink et al., 2017) e envelhecimento dos sistemas de terraceamento, nos quais a degradação estrutural passa a exercer papel central no controle do desempenho hidráulico.

Este trabalho apresenta uma abordagem funcional para o diagnóstico de sistemas de terraceamento baseada no conceito de Capacidade Estrutural Relativa (CER). A CER expressa o balanço espacial entre a capacidade de armazenamento de água dos terraços (CA) e a lâmina de escoamento superficial gerada (LES), permitindo classificar o estado operacional do sistema em três condições: falha, marginal e segura. A introdução da condição marginal representa um avanço conceitual relevante ao permitir a identificação de situações em que o sistema opera próximo ao limiar de colapso estrutural, sendo altamente sensível tanto às condições hidrológicas quanto às práticas de manejo do solo.

Um aspecto central da metodologia proposta é o reconhecimento de que a margem estrutural de segurança do sistema não é universal, uma vez que limiares hidrológicos e padrões de conectividade variam conforme as condições morfológicas e hidrológicas específicas de cada bacia (Castillo et al., 2003; Heckmann et al., 2018). A perda estrutural associada à degradação do terraceamento varia em função da morfologia da bacia, da organização espacial dos terraços, do tipo de solo e do histórico de manejo. Por essa razão, a margem operacional de segurança (σ), utilizada para distinguir as condições marginal e segura, é estimada de forma específica para cada bacia, a partir da distribuição empírica da perda de CA observada entre as condições medida e degradada. Essa abordagem assegura coerência física à análise e evita a aplicação de limiares arbitrários ou generalizados.

Além disso, a abordagem integra a análise da CER com a avaliação do papel dos principais moduladores morfodinâmicos — declividade, IC, fator LS e SPI — que controlam a intensidade e a organização espacial das falhas (Borselli et al., 2008; Cavalli et al., 2013; Heckmann et al., 2018). A associação entre a intensidade da falha,

expressa pelo balanço CA – LES, e esses moduladores é avaliada por meio de matrizes de contingência e estatísticas de associação, permitindo identificar hierarquias de controle geomorfológico e compreender como a degradação estrutural amplifica a sensibilidade do sistema ao relevo.

Por fim, a abordagem avança da quantificação para a interpretação espacial, por meio da tipologia funcional das falhas da CER. A identificação de áreas com falha estrutural permanente, segurança estrutural e condições estruturalmente adequadas, porém hidrologicamente condicionadas, fornece subsídios diretos para a priorização de intervenções. Isso distingue situações em que o manejo do solo é suficiente, daquelas que demandam ações estruturais de redimensionamento ou reconfiguração do sistema de terraceamento.

O objetivo deste trabalho é fornecer um arcabouço metodológico integrado, replicável e operacional para o diagnóstico funcional de sistemas de terraceamento em escala de bacia hidrográfica, apoiando decisões técnicas, planejamento territorial e políticas públicas voltadas à conservação do solo e da água. Embora desenvolvido a partir de estudos de caso específicos, o método é conceitualmente geral e pode ser adaptado a diferentes contextos fisiográficos, desde que respeitadas as premissas físicas que fundamentam a definição da Capacidade Estrutural Relativa.

Contribuições do estudo

Este estudo apresenta contribuições conceituais, metodológicas e operacionais para a avaliação do desempenho hidrológico de sistemas de terraceamento agrícola em escala de bacia hidrográfica, em consonância com a abordagem funcional introduzida neste trabalho. A principal contribuição reside na proposição da Capacidade Estrutural Relativa (CER) como uma métrica funcional espacialmente explícita, capaz de integrar a capacidade de armazenamento de água dos terraços (CA) com a lâmina de escoamento superficial gerada (LES). Ao expressar diretamente o balanço entre infraestrutura instalada e resposta hidrológica efetiva, a CER supera abordagens tradicionais baseadas exclusivamente em critérios geométricos ou normativos e permite avaliar o desempenho hidráulico real do sistema em operação.

Um avanço conceitual central do estudo é a superação da classificação dicotômica de falha, por meio da definição de três estados operacionais — falha, marginal e seguro. A introdução da condição marginal amplia significativamente a capacidade diagnóstica da análise ao permitir a identificação de áreas que operam próximas ao limiar de colapso estrutural, altamente sensíveis tanto às condições hidrológicas quanto às práticas de manejo do solo. Essa abordagem fornece uma representação mais realista, preventiva e funcional do comportamento dos sistemas de terraceamento, especialmente em contextos de intensificação do uso do solo, envelhecimento das estruturas e aumento da frequência de eventos extremos de precipitação.

O estudo também contribui ao demonstrar, de forma empírica e fisicamente fundamentada, que a margem estrutural de segurança do sistema não é um parâmetro universal. A definição da σ de forma específica por bacia, a partir da distribuição da perda de capacidade de armazenamento (ΔCA) observada entre as condições medida e degradada, assegura coerência física à metodologia e evita a aplicação

de limiares arbitrários ou generalizados. Essa estratégia incorpora explicitamente a sensibilidade estrutural de cada sistema, refletindo diferenças associadas à morfologia da bacia, à organização espacial dos terraços, ao tipo de solo e ao histórico de manejo.

Outra contribuição relevante é a integração quantitativa entre o desempenho estrutural do sistema de terraceamento e os controles geomorfológicos do escoamento superficial. A associação entre a intensidade da falha, expressa pelo balanço CA – LES, e os principais moduladores morfodinâmicos — declividade, IC, fator LS e índice de potência do escoamento (SPI) — é avaliada por meio de matrizes de contingência e estatísticas de associação, como o V de Cramér. Essa análise permite identificar hierarquias de controle do relevo e demonstrar, de forma objetiva, como a degradação estrutural amplifica o papel dos fatores morfométricos na organização espacial das falhas.

O estudo avança da mera quantificação para a interpretação espacial ao propor uma tipologia funcional das falhas da CER, baseada na persistência ou alternância dos estados operacionais em diferentes cenários hidrológicos. Essa tipologia permite distinguir falhas estruturalmente controladas, pouco sensíveis ao manejo, de limitações dependentes das condições hidrológicas e dos moduladores topográficos, fornecendo uma leitura funcional direta do território e conectando padrões espaciais recorrentes à eficiência do sistema de terraceamento.

Por fim, a metodologia apresentada possui caráter operacional, replicável e compatível com ambientes de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Ao combinar métricas contínuas, classificação operacional e análise espacial integrada, os resultados oferecem subsídios diretos para a priorização de intervenções em escala de bacia hidrográfica, distinguindo áreas onde práticas de manejo do solo são potencialmente eficazes daquelas que demandam intervenções estruturais, como redimensionamento, redistribuição ou reconfiguração do sistema de terraceamento. Em conjunto, essas contribuições posicionam a CER como um arcabouço metodológico integrado para

o diagnóstico funcional de sistemas de terraceamento agrícola, com aplicação direta em estudos científicos, planejamento territorial e políticas públicas voltadas à conservação do solo e da água.

Fundamentos conceituais

Funcionamento hidrológico do sistema de terraceamento

O sistema de terraceamento agrícola é concebido para atuar como um controle estrutural do escoamento superficial, promovendo a interrupção do fluxo ao longo da encosta, o aumento do tempo de concentração e a ampliação da infiltração da água no solo. Do ponto de vista funcional, cada terraço pode ser interpretado como uma unidade de armazenamento temporário, cuja eficiência depende da relação entre o volume potencial de água gerado a montante e a capacidade efetiva de retenção da estrutura. Em termos operacionais, o desempenho do sistema não é determinado apenas pela geometria individual dos terraços, mas pela integração espacial entre relevo, solo, infraestrutura instalada e manejo. Assim, mesmo sistemas corretamente dimensionados em projeto podem apresentar falhas quando submetidos a processos de degradação estrutural, compactação do solo ou reorganização do escoamento superficial induzida por mudanças no uso e manejo da área. Essa perspectiva reforça a necessidade de avaliar o sistema de terraceamento não apenas como um conjunto de estruturas isoladas, mas como um sistema hidrológico integrado, cuja eficiência emerge do balanço entre geração de escoamento e capacidade de controle estrutural.

Capacidade de Armazenamento (CA) como atributo estrutural

A CA representa o volume máximo de água que pode ser temporariamente retido pelo sistema de terraceamento antes do transbordamento ou ruptura hidráulica. No contexto deste manual, a CA é expressa em termos de lâmina equivalente (mm), permitindo sua comparação direta com a LES.

A CA não é um valor homogêneo no espaço. Ela varia em função da geometria dos terraços (altura, comprimento da base, área da seção e espaçamento), da organização espacial da rede de terraços, da condição física da estrutura (intacta ou degradada), e da conectividade hidráulica entre os segmentos. A degradação estrutural reduz a CA efetiva por meio de processos como rebaixamento do camalhão, erosão localizada, obstrução parcial do canal e perda de continuidade longitudinal. Assim, a CA deve ser interpretada como um atributo dinâmico, sensível ao tempo, ao manejo e à manutenção do sistema.

Lâmina de Escoamento Superficial (LES) e resposta hidrológica

A LES representa o excedente hidrológico gerado quando a precipitação efetiva supera a capacidade de infiltração do solo. Neste trabalho, a LES é estimada a partir da integração entre precipitação de projeto e a Taxa de Infiltração Estável (TIE), medida em campo, conforme metodologia proposta por Pruski et al. (1997) e operacionalizada no software Terraço 4.1. A TIE constitui o elo fundamental entre manejo do solo e resposta hidrológica, pois reflete o estado estrutural da camada superficial do solo, fortemente influenciado por compactação, cobertura vegetal, sistemas de preparo e diversificação de culturas. Alterações no manejo do solo não modificam a capacidade estrutural instalada (CA), mas alteram diretamente a LES, modulando a pressão hidrológica exercida sobre o sistema de terraceamento.

Capacidade Estrutural Relativa (CER)

A CER é definida como o balanço espacial entre a CA e a LES:

$$CER = CA - LES$$

Esse balanço sintetiza, em uma única métrica, a interação entre infraestrutura e resposta hidrológica. Valores negativos de CER indicam que o excedente gerado supera a capacidade estrutural disponível, caracterizando a falha. Valores positivos indicam condições de operação segura ou marginal, dependendo da margem estrutural disponível. A CER não é um índice empírico, mas uma variável fisicamente interpretável, diretamente relacionada à ocorrência ou não de transbordamento, erosão concentrada e ruptura funcional do sistema.

Margem estrutural (σ) e conceito de condição marginal

Um avanço conceitual central deste trabalho é o reconhecimento de que a simples distinção entre falha e não falha é insuficiente para representar o comportamento real dos sistemas de terraceamento. Entre essas duas condições extremas existe uma faixa operacional intermediária, na qual o sistema funciona próximo ao limiar de colapso. Esta faixa é representada pela condição marginal, delimitada por uma margem estrutural σ . Diferentemente de um parâmetro universal, σ representa a perda estrutural típica associada à degradação do sistema, sendo estimada separadamente para cada bacia a partir da distribuição de:

$$\Delta CA = CA_{\text{medida}} - CA_{\text{degradada}}$$

Neste manual, σ foi definido como o percentil P75 da distribuição de ΔCA , representando uma degradação elevada, porém recorrente, típica do sistema analisado. A CA degradada foi definida a partir da redução em 10 cm na altura medida dos terraços.

Essas escolhas conferem robustez estatística e coerência física à definição da condição marginal.

As classes operacionais da CER são, portanto, definidas como:

- **Falha:** $(CA - LES) < 0$
- **Marginal:** $0 \leq (CA - LES) < \sigma$
- **Segura:** $(CA - LES) \geq \sigma$

Moduladores morfodinâmicos do desempenho estrutural

Embora a CER sintetize o balanço estrutural-hidrológico, a intensidade e a organização espacial da falha são moduladas por atributos do relevo e da conectividade do sistema. Neste trabalho, são considerados quatro moduladores principais:

- Declividade (DECL): controla a energia potencial do escoamento e a velocidade de concentração do fluxo;
- IC: expressa a eficiência com que o escoamento se propaga pela encosta e atinge os canais;
- Fator LS: integra comprimento de rampa e declividade, refletindo o potencial de transporte; e
- Índice de Potência do Escoamento (SPI): representa a tendência à concentração do fluxo.

Esses moduladores não definem, por si só, a ocorrência da falha, mas controlam sua severidade, continuidade espacial e persistência, especialmente quando a margem estrutural é reduzida.

Da quantificação à tipologia funcional da falha

A integração entre CER, σ , cenários hidrológicos e moduladores permite avançar da simples quantificação da falha para a identificação de tipologias funcionais, distinguindo:

- Falhas estruturalmente permanentes;
- Áreas estruturalmente seguras; e
- Zonas estruturalmente adequadas, porém hidrologicamente condicionadas.

Essa tipologia fornece uma ponte direta entre diagnóstico técnico e tomada de decisão, permitindo direcionar intervenções de manejo ou estruturais de forma espacialmente explícita.

A Figura 1 apresenta a síntese estruturada da estratégia metodológica adotada neste estudo. O fluxograma integra os componentes climáticos, edáficos e estruturais do sistema de terraceamento, articulando a estimativa da lâmina de escoamento superficial (LES), derivada da Taxa de Infiltração Estável (TIE) sob diferentes cenários de manejo, com a Capacidade de Armazenamento (CA) dos terraços.

O diagnóstico funcional baseia-se no balanço $CA - LES$, que define a Capacidade Estrutural Relativa (CER) e permite classificar o sistema em três estados operacionais: falha ($\Delta < 0$), condição marginal ($0 \leq \Delta < \sigma$) e condição segura ($\Delta \geq \sigma$), considerando a margem estrutural específica de cada bacia.

A partir dessa classificação, as falhas são tipificadas em estruturais - associadas à insuficiência geométrica da capacidade instalada - e condicionais - moduladas por atributos morfodinâmicos como declividade (DECL), índice de conectividade (IC), fator LS e índice de potência do escoamento (SPI). A integração desses elementos possibilita a identificação espacial de áreas críticas prioritárias para intervenção.

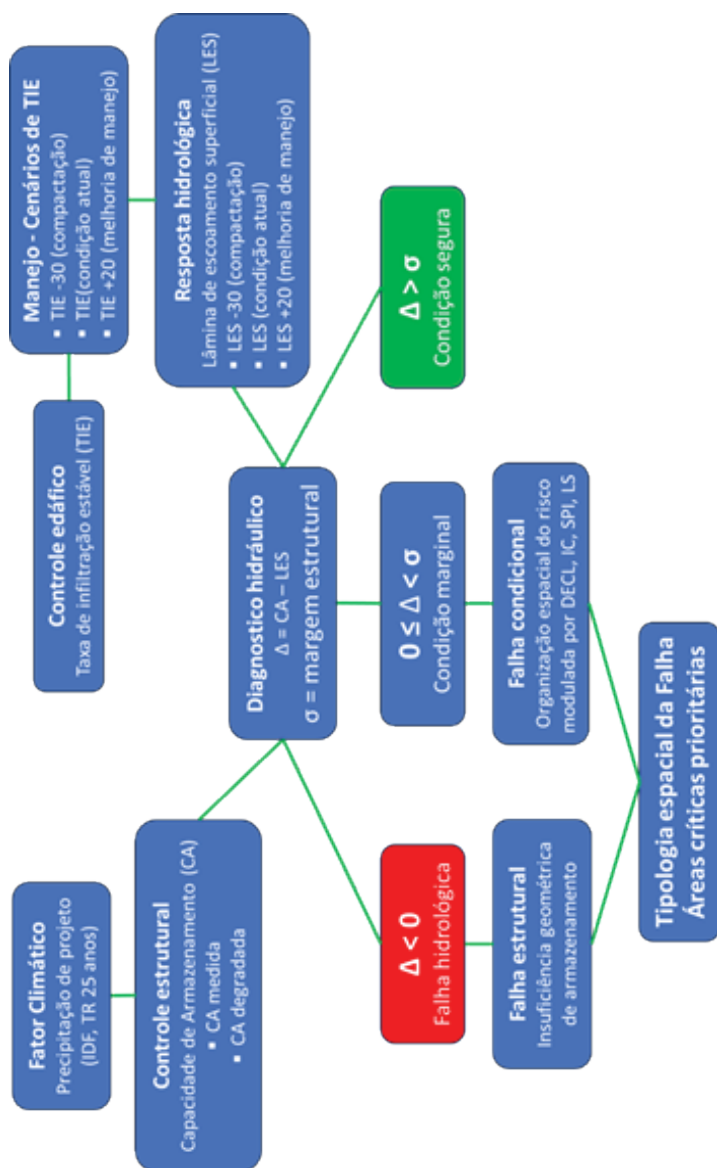


Figura 1. Fluxograma da estratégia metodológica para avaliação do risco hidrológico em microbacias agrícolas, integrando cenários de infiltração (TIE), estimativa da lâmina de escoamento superficial (LES), capacidade estrutural dos terraços (CA) e tipologia funcional das falhas.

Material e Métodos

Área de estudo e unidades de análise

O estudo foi conduzido no município de Toledo, região oeste do estado do Paraná, inserido no domínio do Terceiro Planalto Paranaense. A área apresenta relevo suave ondulado a ondulado, com vertentes predominantemente convexas e drenagem bem definida, características típicas das paisagens agrícolas da região. O clima é classificado como Cfa (Köppen), subtropical úmido, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano e ocorrência recorrente de eventos de alta intensidade. A precipitação média anual de região é de, aproximadamente, 1835 mm.

A área experimental foi composta por duas microbacias hidrográficas de primeira ordem, delimitadas a partir de Modelo Digital de Elevação (MDE) de alta resolução, cujos contornos são apresentados na Figura 2. As microbacias foram selecionadas por apresentarem condições edafo-climáticas semelhantes, uso e manejo agrícola equivalentes e sistemas de terraceamento implantados, permitindo a comparação direta entre respostas hidrológicas em um mesmo contexto regional.

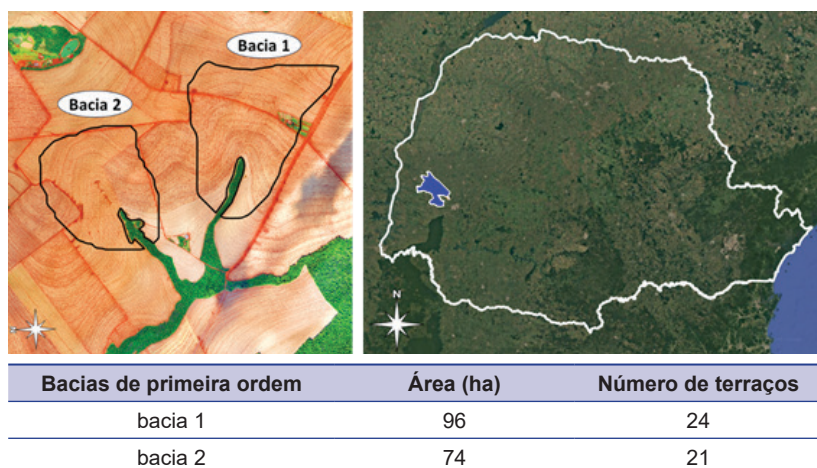


Figura 2. Localização, dimensões e número de terraços das bacias hidrográficas de primeira ordem, localizadas no município de Toledo, PR.

O sistema de produção agrícola predominante na região baseia-se na sucessão soja (verão) – milho segunda safra (inverno), conduzido majoritariamente sob SPD. Apesar da adoção de práticas conservacionistas, a combinação entre relevo ondulado, eventos pluviométricos intensos e limitações estruturais dos sistemas de terraceamento tem resultado em problemas recorrentes de escoamento superficial concentrado e falhas hidráulicas associadas. Como exemplo, a bacia 1 foi submetida a uma reforma de parte dos terraços em virtude de evento extremo ocorrido em outubro de 2017, conforme reportado por Franchini et al. (2025). As bacias, diferem quanto à declividade média, organização espacial do relevo, conectividade do escoamento e configuração do sistema de terraços, o que as tornam adequadas para avaliação comparativa da eficiência estrutural.

Aquisição e processamento dos dados topográficos

Em 03/10/2024, quando a área estava coberta com palhada pós-colheita de milho, foi realizado um plano de voo para coleta de imagens na área de estudo. As imagens foram obtidas por uma aeronave remotamente pilotada (RPA) do tipo quadricóptero, modelo DJI Mavic 3 Enterprise, equipada com câmera RGB de alta resolução. O plano de voo foi elaborado com o software DJI Pilot, considerando uma altura de voo de 120 metros, sobreposição longitudinal de 80% e lateral de 70%, parâmetros adequados para a geração de produtos fotogramétricos com elevada consistência geométrica.

Para correção do sinal GNSS, foi utilizado o método RTK (*Real Time Kinematic*). Para o uso da técnica, foi utilizado um receptor GNSS, modelo Emlid Reach RS3, equipado com tecnologia RTK e a estação de referência da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), localizada na Universidade Estadual do Oeste do Paraná

(Unioeste), em Cascavel, a 20 km do local do trabalho. A real posição da base RS3 foi obtida após as correções recebidas da estação de referência, por meio de um protocolo NTRIP via rede de internet móvel (4G). A seguir a base RS3 foi conectada ao controlador da RPA por meio de um protocolo NTRIP local via rede wi-fi para enviar as correções. Nesta configuração o voo foi realizado com correção RTK e precisão aproximada de 0,02 m.

As imagens foram processadas no software *Agisoft Metashape Professional*. Como resultado do processamento, foram obtidos o ortomosaico e o MDE, com resolução de 1 metro/pixel, utilizados como base para as análises subsequentes. O MDE constituiu a base para a extração das variáveis topográficas e hidrológicas utilizadas no estudo. A partir do MDE foram derivados, em ambiente de sistema de informações geográficas, os seguintes parâmetros: altitude, declividade, área de contribuição, comprimento de rampa, Índice de Potência de Fluxo (SPI), fator LS e IC.

Declividade

O MDE original foi submetido a um processo de suavização e adequação de escala para a determinação da declividade em porcentagem (Figura 3). O processo consistiu em várias etapas, descritas de forma detalhada por Franchini et al. (2025), utilizando os softwares Qgis (QGIS, 2024) e Vesper (Minasny et al., 2005).

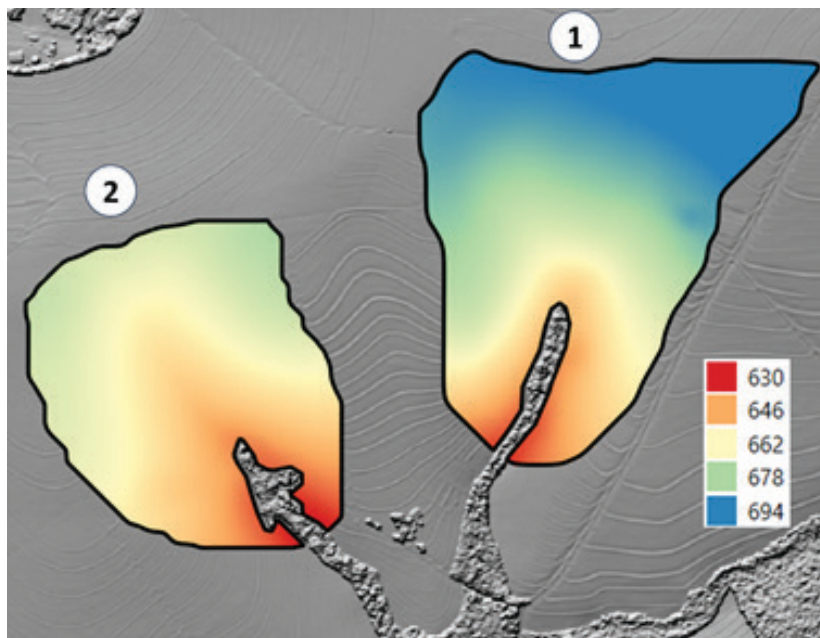


Figura 3. Modelo digital de elevação suavizado, mostrando a variação altimétrica nas bacias 1 e 2, utilizadas no estudo.

Índice de conectividade (IC)

Aplicou-se o IC, conforme proposto por Cavalli et al. (2013), para avaliar o efeito da conectividade de sedimentos nas bacias hidrográficas. O IC considera as características da área de drenagem (componente a montante, Dup) e o comprimento do caminho de fluxo que uma partícula precisa percorrer até chegar ao sumidouro mais próximo (componente a jusante, Ddn).

$$IC = \log_{10} \left(\frac{D_{up}}{D_{dn}} \right) = \log_{10} \left(\frac{WS\sqrt{A}}{\sum_i \frac{d_i}{W_i S_i}} \right)$$

Onde:

W é o fator médio de ponderação da rugosidade da superfície;

S é o gradiente médio de declividade da área de contribuição a montante (m/m);

A é a área de contribuição a montante (m^2);

d_i é o comprimento do caminho de fluxo ao longo da célula i , seguindo a direção de maior declividade a jusante (m); e

W_i e S_i são, respectivamente, o fator de ponderação e o gradiente de declividade da célula i .

Índice de Potência de Escoamento (SPI)

O SPI é um indicador topográfico–hidrológico que expressa o potencial de energia do escoamento superficial concentrado ao longo das vertentes, sendo amplamente utilizado como modelo da capacidade erosiva do fluxo. O SPI combina a contribuição da área de drenagem a montante com a declividade local do terreno, refletindo a intensidade do trabalho hidráulico exercido pelo escoamento superficial.

Neste estudo, o SPI foi calculado a partir do MDE conforme a expressão:

$$SPI = A_s \cdot \tan(\beta)$$

Onde:

A_s representa a área específica de contribuição ($m^2 \cdot m^{-1}$); e

β a declividade local (rad).

Valores elevados de SPI indicam setores da paisagem com maior concentração de fluxo e maior potencial de erosão linear, enquanto valores baixos estão associados a áreas de escoamento difuso e menor energia hidráulica.

O SPI foi utilizado como indicador da energia potencial do escoamento superficial, especialmente relevante em áreas onde a CA dos

terraços é limitada, contribuindo para a intensificação de processos erosivos e para o aumento da probabilidade de falhas hidráulicas. Para redução de escala e normalização os resultados foram transformados pela aplicação do logaritmo na base 10.

Fator comprimento e declividade da rampa (LS)

O fator LS corresponde ao componente topográfico da Equação Universal de Perda de Solo (USLE/RUSLE), representando o efeito combinado do comprimento da rampa (L) e da declividade do terreno (S) sobre a geração e o transporte de sedimentos. Esse fator expressa a influência da geometria da vertente na aceleração do escoamento superficial e na amplificação dos processos erosivos.

O fator LS foi derivado a partir do MDE, considerando a área de contribuição e a declividade local. Valores elevados de LS indicam vertentes mais longas e/ou mais íngremes, com maior capacidade de concentração do escoamento superficial e maior suscetibilidade à erosão hídrica. O fator LS foi empregado como indicador do controle geométrico da vertente sobre o escoamento superficial, complementando a informação fornecida pelo SPI. Enquanto o SPI reflete a energia hidráulica instantânea associada ao fluxo concentrado, o fator LS representa o efeito acumulativo da forma da vertente sobre o desenvolvimento dos processos erosivos. Para redução de escala e normalização os resultados foram transformados pela aplicação do logaritmo na base 10.

Os parâmetros utilizados para o cálculo do IC, LS e SPI foram determinados usando os MDEs originais e o SAGA (*System for Automated Geoscientific Analyses*), que é um Sistema de Informação Geográfica (SIG) para análise e modelagem geocientífica, com foco em ferramentas para processamento de dados raster e análise espacial. As ferramentas e os parâmetros utilizados são indicados na Tabela 1.

Tabela 1. Ferramentas do SAGA (*System for Automated Geoscientific Analyses*) para a determinação de variáveis utilizadas para o cálculo dos índices topográficos IC, SPI e LS.

Ferramentas	Variável	Objetivo
Fill Sinks (Wang; Liu)	DEM preenchido	Correção do MDE
Flow Accumulation (Qm of ESP).	Área de contribuição (A)	Calcula a área upslope
Slope, Aspect, Curvature	Inclinação média (S)	Deriva a inclinação local
Terrain Ruggedness Index	Fator de ponderação (W)	Estima a rugosidade da superfície
Flow Path Length	Comprimento do Caminho (di)	Cálculo dos comprimentos de fluxo

Todos os produtos foram calculados de forma consistente entre as bacias, utilizando os mesmos algoritmos, parâmetros e resolução espacial, de modo a permitir comparações diretas. A unidade básica de análise espacial foi o *pixel raster*, adotando-se a resolução de 10 metros, adequada para os objetivos do estudo e a representação dos MDEs e dos mapas derivados. Todas as análises foram realizadas de forma espacialmente alinhada pixel a pixel, garantindo coerência geométrica entre variáveis.

Estimativa da Capacidade de Armazenamento (CA)

Estimativa da Capacidade de Armazenamento (CA) usando dados vetoriais

A CA foi determinada individualmente para cada terraço a partir da geometria dos canais e taludes, considerando sua seção transversal e altura útil. Inicialmente a diferença entre os mapas de MDE original e suavizado permitiu visualizar em detalhes os terraços presentes nas bacias (Figura 4). Os terraços em cada bacia foram identificados

e delineados manualmente por inspeção visual do MDE original com resolução de 1 metro/pixel (Figura 5). A seguir foram definidos transectos para extração da altura dos terraços (Figura 5). Os transectos foram definidos para obter valores representativos de altura para cada terraço. Em cada ponto definido pela interseção do terraço com o transecto foram identificadas as posições equivalentes ao canal (1) e à crista (2). As posições foram monitoradas com auxílio do *plugin terrain profile* do QGIS, conforme descrito por Franchini et al. (2025) e os valores das cotas em cada posição foram extraídos e a diferença entre eles determinada. A seguir o valor da altura média de cada terraço foi estabelecido com auxílio de uma planilha eletrônica.

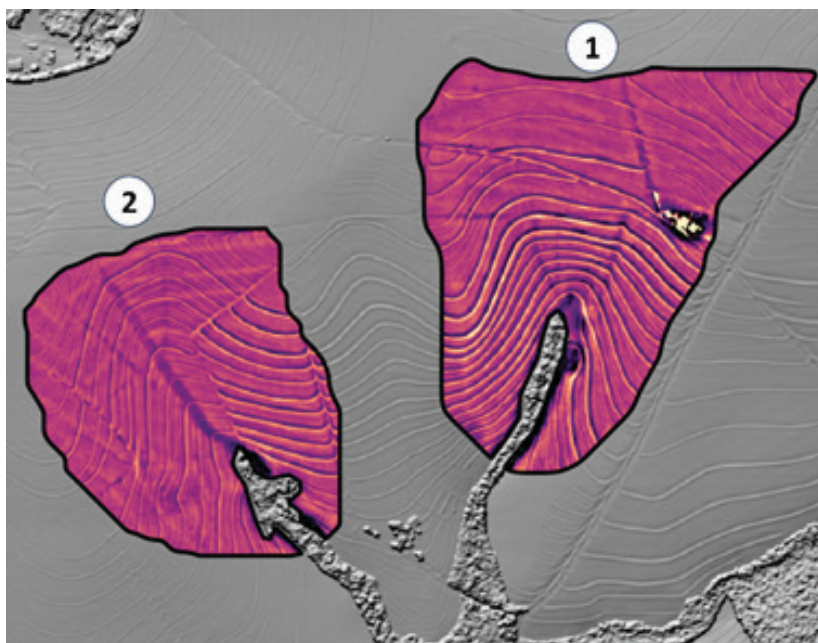


Figura 4. Mapas da diferença entre MDE original e suavizado realçando os terraços presentes nas bacias 1 e 2.

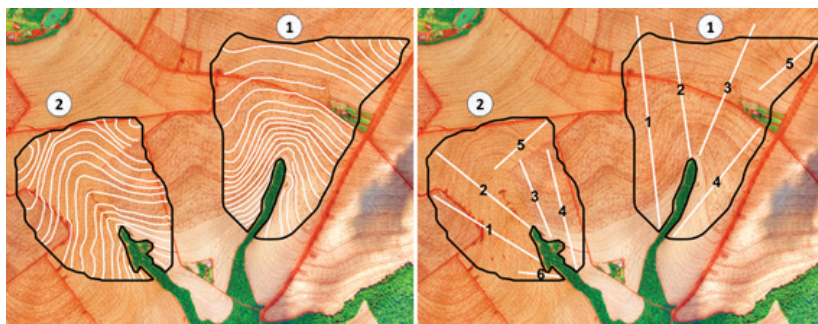


Figura 5. Demarcação dos terraços e transectos para extração da altura usando o *plugin terrain profile*.

A CA foi estimada considerando um perfil de seção triangular. A partir da altura média de cada terraço (H), calculou-se o comprimento da base (m) considerando a declividade na posição (xy) de cada terraço ($St_{xy} = m/m$) e a declividade do talude ($Sm = 0,21 \text{ m/m}$) (valor assumido para terraço de base larga), conforme a expressão:

$$\text{Base (m)} = \frac{H}{St} + \frac{H}{Sm}$$

Após a determinação do comprimento da base, foi possível estimar a seção média transversal de cada terraço pela expressão:

$$\text{Seção (m}^2\text{)} = \frac{1}{2} (H \times \text{Base})$$

A CA em volume (m^3) foi obtida multiplicando a seção média pelo comprimento de cada terraço. A CA de todos terraços foi somada para determinar a CA da bacia. Em seguida, o volume total foi dividido pela área da bacia, convertendo-se os resultados em litros por metro quadrado, equivalente à lâmina de água (mm) capaz de ser armazenada pelo sistema implantado (Tabelas 2 e 3). Esses são os valores de

CA definidos usando dados vetoriais dos terraços e das bacias. Nas tabelas 2 e 3 são apresentados os dados vetoriais obtidos para os terraços nas bacias 1 e 2.

Foram consideradas duas condições estruturais para definição da CA. A estrutura medida, representando a condição observada em campo; e a estrutura degradada, representando a condição com perda de qualidade estrutural por desgaste natural ao longo do tempo. A estrutura degradada foi definida como a perda de 10 cm na altura de todos os terraços na estrutura medida.

Espacialização da Capacidade de Armazenamento (CA) usando modelagem geoestatística

Para possibilitar a comparação direta com a LES, os volumes obtidos foram espacializados e ponderados pela área de contribuição, sendo expressos em termos de lâmina equivalente (mm) (Figura 6). Para isso, os valores de volume de cada terraço na forma de vetor foram então rasterizados, gerando um valor georreferenciado a cada 10 metros de terraço. Esses valores foram convertidos no formato xyz para modelagem geoestatística no programa Vesper, visando a espacialização dos valores de CA em toda a bacia. O melhor ajuste foi obtido com o modelo esférico para ambas as bacias (Tabela 4). Os dados foram transformados pelo logaritmo natural antes de ajuste dos modelos.

Os dados de volume, após krigagem, foram gerados para uma grade regular de 10 metros. Os dados de volume foram ponderados de forma que o valor médio de CA para toda a bacia igualasse o valor médio obtido na etapa vetorial (Tabelas 2 e 3).

Tabela 2. Parâmetros avaliados nos terraços da bacia 1 nas condições estruturais medida (M) e degradada (D).

ID	Comprimento (m)	Declividade St (%)	Altura (m)		Base (m)		Seção (m²)		Volume (m³)		CA (mm)	
			M	D	M	D	M	D	M	D	M	D
1	1019	7,7	0,87	0,77	15,5	13,7	6,7	5,3	6864	5378	172	134
2	1047	6,7	0,97	0,87	18,9	17,0	9,1	7,3	9574	7694	239	192
3	1067	6,3	0,75	0,65	15,7	13,6	5,9	4,4	6302	4743	158	119
4	1008	6,7	0,82	0,72	16,2	14,2	6,6	5,1	6670	5139	167	128
5	737	5,0	0,73	0,63	18,0	15,6	6,6	4,9	4833	3594	121	90
6	960	4,9	0,27	0,17	6,8	4,3	0,9	0,4	892	356	22	9
7	1026	4,4	0,30	0,20	8,2	5,4	1,2	0,5	1252	553	31	14
8	272	10,0	0,22	0,12	3,3	1,8	0,4	0,1	101	31	3	1
9	481	8,8	0,23	0,13	3,7	2,1	0,4	0,1	202	64	5	2
10	673	8,9	0,42	0,32	6,8	5,2	1,4	0,8	971	567	24	14
11	780	8,1	0,60	0,50	10,2	8,5	3,1	2,1	2385	1653	60	41
12	1420	10,0	0,36	0,26	5,3	3,8	1,0	0,5	1355	707	34	18
13	998	8,0	0,47	0,37	8,0	6,3	1,9	1,2	1862	1148	47	29
14	983	8,3	0,53	0,43	8,8	7,2	2,3	1,5	2295	1508	57	38
15	984	9,5	0,41	0,31	6,3	4,7	1,3	0,7	1269	727	32	18
16	979	8,8	0,52	0,42	8,4	6,8	2,2	1,4	2158	1411	54	35
17	1001	7,7	0,70	0,60	12,5	10,8	4,4	3,2	4413	3248	110	81
18	493	4,6	0,38	0,28	10,1	7,5	1,9	1,1	955	521	24	13
19	406	5,5	0,13	0,03	2,9	0,6	0,2	0,0	76	4	2	0
20	334	5,3	0,31	0,21	7,3	4,9	1,1	0,5	378	173	9	4
21	265	5,0	0,12	0,02	2,9	0,5	0,2	0,0	46	1	1	0
22	209	4,5	0,40	0,30	10,9	8,2	2,2	1,2	458	259	11	6
23	142	3,8	0,22	0,12	6,9	3,8	0,8	0,2	109	33	3	1
24	67	2,6	0,49	0,39	21,1	16,8	5,2	3,3	346	219	9	5
17351 ^a		6,7 ^b	0,47 ^b	0,37 ^b	9,8 ^b	7,6 ^b	2,8 ^b	1,9 ^b	55767 ^a	39731 ^a	58 ^b	41 ^b

Declividade Sm = 21%; ^a soma; ^b média.

Tabela 3. Parâmetros avaliados nos terraços da bacia 2 nas condições estruturais medida (M) e degradada (D).

ID	Comprimento (m)	Declividade St(%)	Altura (m)		Base (m)		Seção (m ²)		Volume (m ³)		CA (mm)	
			M	D	M	D	M	D	M	D	M	D
1	287	4,2	0,07	0,00	2,0	0,0	0,1	0,0	21	0	1	0
2	252	4,4	0,05	0,00	1,4	0,0	0,0	0,0	9	0	0	0
3	223	3,9	0,11	0,01	3,3	0,3	0,2	0,0	41	0	1	0
4	125	2,5	0,03	0,00	1,4	0,0	0,0	0,0	3	0	0	0
5	615	3,3	0,08	0,00	2,9	0,0	0,1	0,0	73	0	2	0
6	383	3,6	0,04	0,00	1,2	0,0	0,0	0,0	9	0	0	0
7	339	3,3	0,15	0,05	5,1	1,6	0,4	0,0	126	12	4	0
8	236	2,7	0,03	0,00	1,3	0,0	0,0	0,0	5	0	0	0
9	189	9,4	0,21	0,11	3,2	1,7	0,3	0,1	63	17	2	0
10	235	9,5	0,10	0,00	1,6	0,1	0,1	0,0	19	0	1	0
11	334	8,4	0,29	0,19	4,8	3,1	0,7	0,3	231	98	7	3
12	723	7,4	0,34	0,24	6,2	4,3	1,0	0,5	750	371	21	11
13	807	7,1	0,38	0,28	7,2	5,3	1,4	0,7	1099	597	31	17
14	880	6,8	0,35	0,25	6,8	4,9	1,2	0,6	1052	538	30	15
15	971	6,1	0,48	0,38	10,1	8,0	2,4	1,5	2349	1471	67	42
16	1022	5,2	0,44	0,34	10,6	8,2	2,3	1,4	2396	1435	68	41
17	1156	5,4	0,46	0,36	10,8	8,5	2,5	1,5	2885	1773	82	50
18	1256	5,2	0,46	0,36	11,1	8,7	2,6	1,6	3205	1965	91	56
19	1228	4,7	0,55	0,45	14,2	11,7	3,9	2,6	4822	3231	137	92
20	1229	4,8	0,41	0,31	10,5	7,9	2,2	1,2	2644	1514	75	43
21	1244	3,9	0,62	0,52	18,6	15,6	5,7	4,0	7115	4990	202	141
13734 ^a		5,3 ^b	0,27 ^b	0,18 ^b	6,4 ^b	4,3 ^b	1,3 ^b	0,8 ^b	28914 ^a	18013 ^a	39 ^b	24 ^b

Declividade Sm = 21%; a soma; b média.

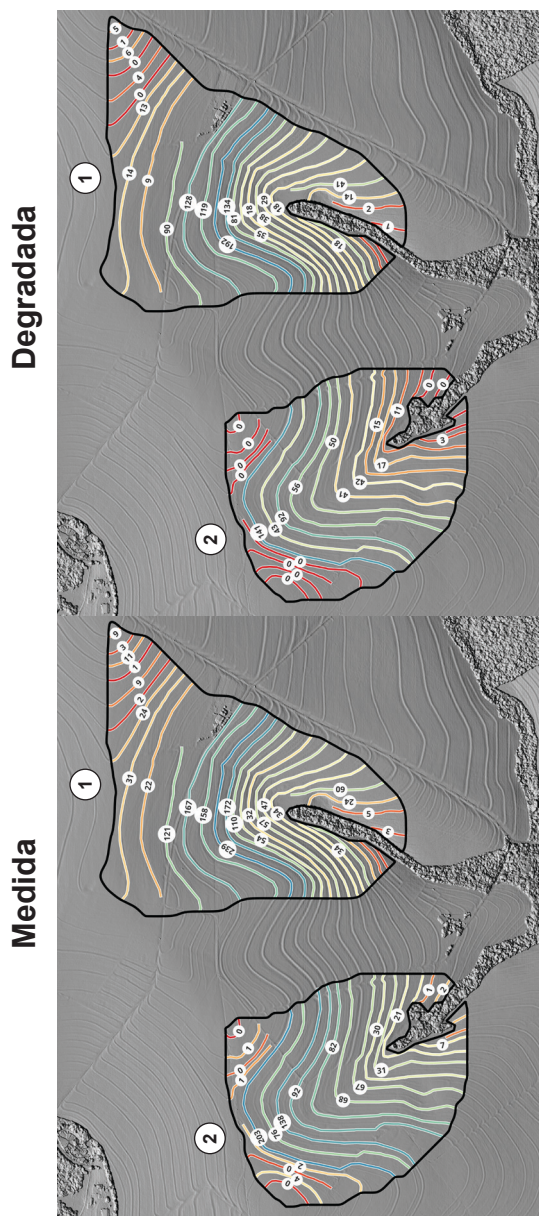


Tabela 4. Modelos ajustados aos dados CA para as bacias 1 e 2.

Bacia	Modelo	Lags	C ₀	C ₁	A1	RMSE	AIC
1	Esférico	6	0,037	0,690	283,9	0,005	-54,15
2	Esférico	7	0,701	2,187	262,4	0,003	-40,47

C₀ = variância aleatória; C₁ variância estrutural; A1 = alcance (m); RMSE = raiz quadrada do erro médio; AIC = Critério de informação de Aikake.

Estimativa da Taxa de Infiltração Estável (TIE)

A TIE foi determinada por meio de medições de campo realizadas com infiltrômetro do tipo Cornell aperfeiçoado (Seratto et al., 2019), em 109 pontos regularmente distribuídos nas bacias, seguindo uma grade amostral regular de 120 metros (Figura 7). Os valores observados foram interpolados por geoestatística, usando o software Vesper, gerando superfícies contínuas em formato raster com a resolução espacial de 10 metros.

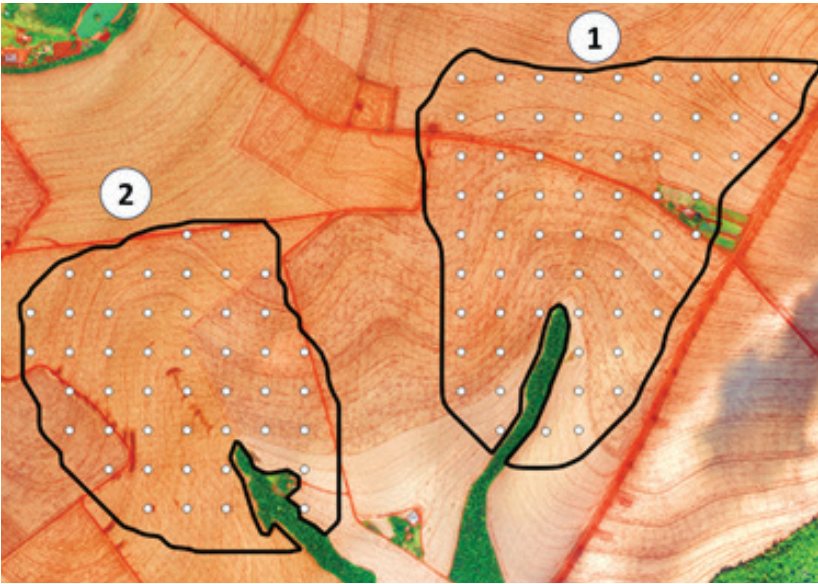


Figura 7. Pontos de avaliação da TIE nas bacias. Modelo ajustado = esférico; C0 = 1781; C1 = 573; A1 = 719; RMSE = 22,19; AIC = 53,95.

Com o objetivo de avaliar a sensibilidade da geração de escoamento superficial a alterações funcionais do solo associadas ao manejo agrícola, foram definidos cenários de TIE, a partir da superfície interpolada da TIE medida em campo. Além do cenário de referência, correspondente à condição atual observada (1,0×), foram simulados dois cenários adicionais: um cenário de redução da infiltração (0,7×) (TIE -30%), representativo de condições de compactação do solo, e um cenário de aumento da infiltração (1,2×) (TIE +20%), associado à melhoria do manejo e da estrutura física do solo.

Cálculo da Lâmina de Escoamento Superficial (LES)

Para cada cenário de TIE, a LES foi estimada por meio de modelo de resposta, definido no software Terraço 4.1. Com base nas informações de precipitação e TIE, o software realiza uma estimativa da LES, com base no método proposto por Pruski et al. (1997). Foram utilizadas a TIE original, TIE (-30) e TIE (+20) para estimar a LES original, LES (-30) e LES (+20), por meio de uma equação que descreve a relação entre a TIE e a LES (Figura 8). A equação foi obtida para um período de retorno de 25 anos e valores de TIE de 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80 mm/h. O modelo assume que a geração de escoamento superficial se inicia quando a intensidade instantânea da precipitação se iguala à TIE, sendo a LES resultante da diferença entre a precipitação total do evento e a parcela infiltrada.

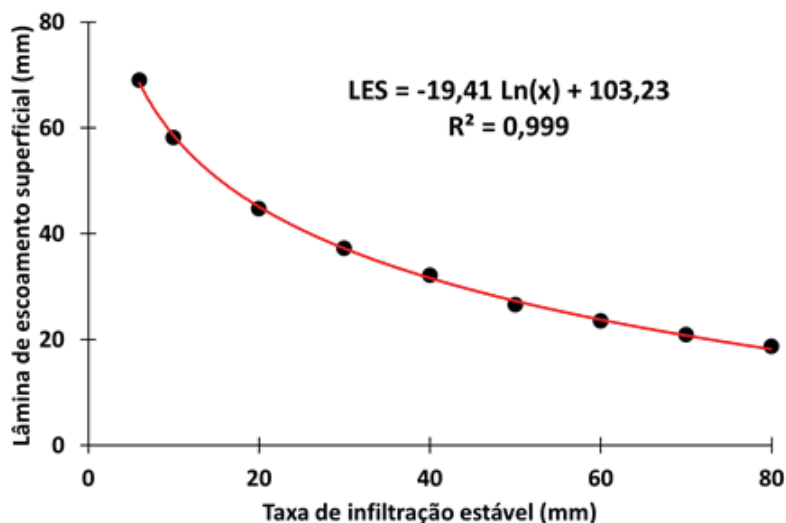


Figura 8. Equação para estimativa de LES a partir da TIE determinada a partir de um período de retorno de 25 anos e TIE variando entre 5 e 80 mm/h, utilizando o software Terraço 4.1.

A LES foi calculada para cada cenário hidrológico a partir da precipitação de projeto e da TIE correspondente, utilizando o software Terraço 4.1. A LES foi espacializada de forma consistente com a resolução do MDE e da CA, permitindo o cálculo pixel a pixel do balanço estrutural-hidrológico.

Cálculo da Capacidade Estrutural Relativa (CER)

A CER foi calculada para cada pixel, segundo a expressão:

$$CER = CA - LES$$

Esse cálculo foi realizado para todas as combinações de estrutura (medida e degradada) e de cenários hidrológicos (compactado, normal e melhorado). Os mapas resultantes de CER foram mantidos

inicialmente como variáveis contínuas (em mm), permitindo a análise direta da magnitude e da distribuição espacial do balanço estrutural.

Estimativa da margem estrutural (σ)

A σ foi estimada separadamente para cada bacia, a partir da distribuição de:

$$\Delta CA = CA_{\text{medida}} - CA_{\text{degradada}}$$

Foram calculados os percentis P25, P50, P75 e P100 da distribuição de ΔCA . O valor de σ foi definido como o percentil P75, representando uma perda estrutural elevada, porém recorrente e típica do sistema. Essa abordagem garante que σ tenha significado físico, reflita a sensibilidade estrutural específica de cada bacia e não seja imposto arbitrariamente ou transferido entre sistemas distintos.

Classificação dos estados operacionais da CER

Com base nos valores de CER e na margem σ específica de cada bacia, os mapas foram classificados em três estados operacionais:

- **Falha:** $(CA - LES) < 0$
- **Marginal:** $0 \leq (CA - LES) < \sigma$
- **Segura:** $(CA - LES) \geq \sigma$

A classificação foi realizada por meio de expressões condicionais na calculadora raster do QGIS, garantindo reprodutibilidade e rastreabilidade do procedimento.

Discretização estatística para análise de associação espacial

Para a análise da associação espacial entre a intensidade da falha (CER) e os moduladores morfodinâmicos (DECL, IC, LS e SPI), as variáveis foram discretizadas em quartis globais (Q1, Q2 e Q3).

Esses limiares foram utilizados exclusivamente para fins estatísticos, visando:

- construção de matrizes de contingência 3×3;
- cálculo do teste do χ^2 ;
- estimativa do V de Cramér.

Importante ressaltar que esses quartis não possuem significado físico-operacional e não devem ser confundidos com os limiares baseados na margem CA-LES utilizados para definir falha, marginalidade e segurança.

Análise estatística e medidas de associação

A associação entre classes de CER e moduladores foi avaliada por meio do teste do χ^2 de independência e do cálculo do V de Cramér, como medida de intensidade da associação. As análises foram realizadas por bacia, cenário hidrológico e condição estrutural (medida e degradada). Essa abordagem permitiu quantificar o grau de controle morfométrico da intensidade da falha e avaliar como esse controle se altera com a degradação estrutural e com os cenários de manejo.

Tipologia espacial dos estados operacionais

Por fim, foi realizada a tipificação espacial dos estados operacionais da CER, baseada na persistência ou alternância das classes (falha, marginal e segura) ao longo dos diferentes cenários.

Essa tipologia permitiu distinguir:

- falhas estruturais permanentes;
- áreas estruturalmente seguras;
- áreas estruturalmente adequadas, porém, hidrológicamente condicionadas.

A análise foi conduzida exclusivamente a partir da recorrência espacial dos estados, sem introdução de novos limiares, garantindo coerência com a definição original da CER.

Síntese metodológica

O método integra medições de campo, modelagem hidrológica, análise espacial e estatística inferencial em um fluxo único, fisicamente fundamentado e operacionalmente reproduzível, permitindo diagnosticar não apenas onde o sistema falha, mas por que falha e sob quais condições essa falha pode ser mitigada ou exige intervenção estrutural.

Resultados e Discussão

Distribuição dos moduladores geomorfológicos

Os resultados indicam que os moduladores geomorfológicos explicam diferenças estruturais importantes entre as bacias, especialmente no que se refere à conectividade e à concentração do escoamento. No entanto, essas variáveis não determinam isoladamente a ocorrência de falhas, atuando principalmente na organização espacial da resposta hidrológica.

A Tabela 5 apresenta a distribuição de frequência, área equivalente e participação percentual dos quantis globais das variáveis declividade, IC, fator LS e SPI para as bacias 1 e 2. Os resultados evidenciam diferenças estatisticamente significativas entre as bacias para todas as variáveis analisadas, com valores elevados de qui-quadrado (χ^2) e p-valores extremamente baixos, indicando rejeição inequívoca da hipótese de independência entre bacia e classe do modulador.

Declividade

Para a declividade, observa-se um padrão claramente contrastante entre as bacias. A bacia 2 concentra maior proporção de área nos quantis inferiores (até Q1), enquanto a bacia 1 apresenta predominância nos quantis superiores (acima de Q3), onde se concentram as maiores declividades. O valor de V de Cramér (0,292) indica associação moderada a forte, confirmando que a declividade é um dos principais elementos discriminantes entre as duas bacias. Esse resultado sugere que a bacia 1 possui um relevo estruturalmente mais íngreme, condição que potencializa processos de geração e concentração do escoamento superficial.

Tabela 5. Distribuição espacial dos quantis globais de frequência, área equivalente e participação percentual dos moduladores morfométricos nas bacias 1 e 2.

Quantis globais	Frequência		Área (ha)		%		χ²	V de Cramér	Inter- pretação
	Decl_1	Decl_2	Decl_1	Decl_2	Decl_1	Decl_2			
4,3	1770	2215	18	22	20	32	1363	0,292	Moderada/forte
5,5	1674	2311	17	23	19	33			
6,9	2503	1481	25	15	28	21			
15,1	3091	894	31	9	34	13			
	IC_1	IC_2	IC_1	IC_2	IC_1	IC_2			Moderada
-4,9	1868	2117	19	21	21	31	1190	0,273	
-4,4	2042	1943	20	19	23	28			
-3,7	1940	2044	19	20	21	30			
-0,1	3188	797	32	8	35	12			
	LS_1	LS_2	LS_1	LS_2	LS_1	LS_2			Moderada
0,21	1778	2207	18	22	20	32	649	0,202	
0,29	1983	2002	20	20	22	29			
0,39	2498	1486	25	15	28	22			
1,14	2779	1206	28	12	31	17			
	SPI_1	SPI_2	SPI_1	SPI_2	SPI_1	SPI_2			Fraca/moderada
0,26	1903	2082	19	21	21	30	193	0,110	
0,38	2266	1719	23	17	25	25			
0,58	2423	1561	24	16	27	23			
3,06	2446	1539	24	15	27	22			

Observações para interpretação da tabela: Quantis Q1(0-25%), Q2(25-50%), Q3(50-75%) e Q4(75-100%); Frequência: número de pixels em cada quantil; Área: equivalente em área considerando que cada pixel representa 100 m²; Distribuição percentual da área em relação a área total de cada bacia (Figura 2). Teste X² p-valor < 0,001.

No mapa de declividade (Figura 9), observa-se que os maiores valores se organizam principalmente ao longo do talvegue e das encostas adjacentes, em ambas as bacias, evidenciando o controle do relevo sobre as zonas preferenciais de concentração do escoamento. Entretanto, essas manchas íngremes são mais extensas e contínuas na bacia 1, enquanto na bacia 2 aparecem mais restritas e localizadas, com predominância de declividades baixas a médias no restante da área. Essa leitura espacial é consistente com a tabela de quantis globais: a bacia 1 concentra maior proporção de área no quantil superior (34% em Q4) do que a bacia 2 (13%), reforçando que a bacia 1 possui maior participação de encostas potencialmente mais críticas do ponto de vista hidrológico-erosivo.

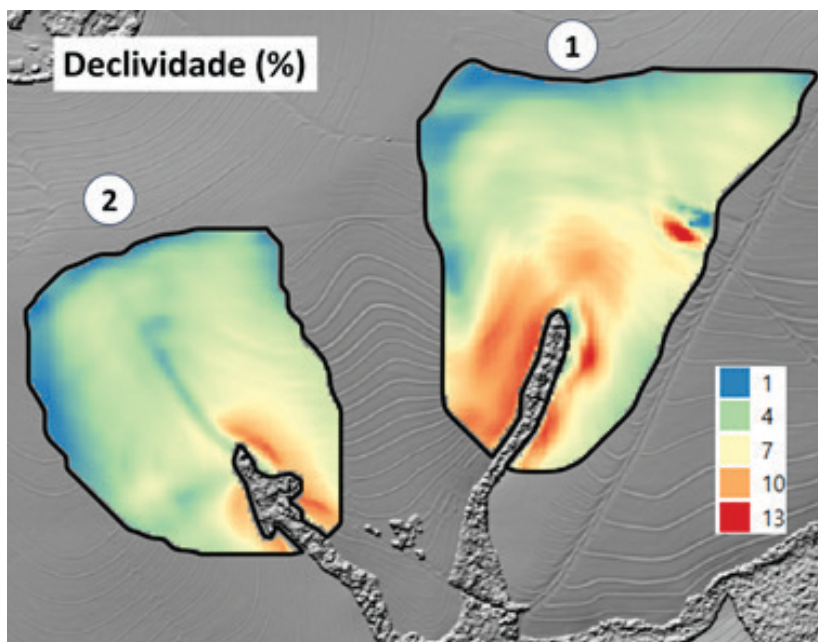


Figura 9. Mapa de declividade nas bacias 1 e 2.

Índice de conectividade (IC)

Comportamento semelhante é observado para IC (Tabela 5 e Figura 10). Considerando que valores mais negativos indicam menor conectividade hidrossedimentológica, a bacia 2 apresenta maior participação relativa nos quantis mais baixos de IC, enquanto a bacia 1 concentra parcela substancial da área nos quantis superiores, correspondentes a valores menos negativos e, portanto, maior conectividade. O valor de V de Cramér (0,273) reforça uma associação moderada entre IC e bacia, evidenciando que a bacia 1 tende a apresentar uma rede de escoamento mais eficiente em termos de transferência de água e sedimentos ao longo da encosta (Tabela 5).

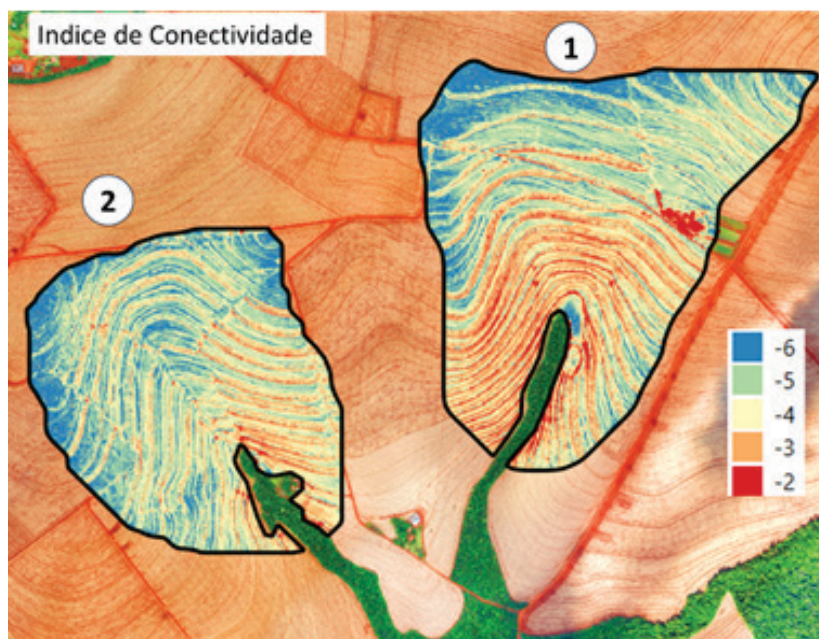


Figura 10. Índice de conectividade nas bacias 1 e 2.

No mapa do IC (Figura 10), observa-se um padrão espacial fortemente controlado pela organização do relevo e do sistema de terraços, com valores menos negativos (tons amarelo-vermelho, -3 a -2) concentrando-se preferencialmente ao longo do talvegue e das faixas imediatamente adjacentes, indicando maior conectividade hidrosedimentológica nessas zonas. As áreas com valores mais negativos (tons azulados, -6 a -5), associadas a menor conectividade, distribuem-se majoritariamente nas porções mais altas e interfluviais das duas bacias.

Entretanto, o contraste entre as bacias é evidente. Na bacia 1, as faixas de maior conectividade formam corredores mais contínuos e extensos, acompanhando o eixo do talvegue e atravessando sucessivos terraços, o que sugere maior eficiência na transmissão do escoamento e do excedente superficial ao longo do sistema. Na bacia 2, embora o mesmo padrão geral esteja presente, as áreas de maior conectividade aparecem mais fragmentadas e restritas, com predomínio espacial de valores baixos de IC.

Essa leitura espacial é coerente com os resultados tabulares dos quantis globais de IC, nos quais a bacia 1 apresenta maior participação relativa nos quantis superiores (menos negativos, mais críticos) quando comparada à bacia 2 (Tabela 5). Os testes estatísticos (χ^2 elevado e V de Cramér classificado como moderado) confirmam que essa diferença não é aleatória, mas reflete um padrão estrutural consistente de conectividade mais elevada na bacia 1.

Do ponto de vista funcional, o mapa reforça que a bacia 1 possui maior propensão à conexão hidrológica entre encostas e talvegue, aumentando a eficiência do transporte de água e sedimentos sob eventos de escoamento, enquanto a bacia 2 apresenta maior desconexão relativa, com maior capacidade de retenção espacial, ainda que limitada por fatores estruturais em cenários de degradação (Figura 10).

Fator LS

O fator LS também discrimina de forma consistente as bacias. A bacia 2 domina os quantis inferiores, enquanto a bacia 1 concentra maior área nos quantis superiores, associados a maiores comprimentos de rampa e/ou declividades mais elevadas (Tabela 5). O V de Cramér de 0,202 indica associação moderada, reforçando o papel do relevo combinado (declividade $\times$ comprimento de encosta) como modulador relevante da resposta hidrológica e erosiva.

O mapa do fator LS (Figura 11) evidencia um padrão espacial fortemente condicionado pela organização das encostas e pela continuidade do escoamento superficial, com valores mais elevados associados aos segmentos de encosta mais longos e íngremes, especialmente nas áreas que convergem para o talvegue.

Em ambas as bacias, observa-se que os maiores valores de LS se concentram ao longo das faixas de contribuição direta ao canal, refletindo a combinação entre declividade local e aumento do comprimento efetivo de rampa. Contudo, a intensidade e a continuidade desses valores diferem entre as bacias.

Na bacia 1, os valores elevados de LS formam corredores mais contínuos e extensos, acompanhando o eixo principal do talvegue e atravessando sucessivas linhas de terraços. Esse padrão indica maior potencial de concentração de energia erosiva, coerente com a maior presença da bacia nos quantis superiores de LS observados na tabela 5 e com os valores mais elevados de χ^2 e V de Cramér, que apontam diferença estatisticamente significativa em relação à bacia 2.

Na bacia 2, embora o padrão geral seja semelhante, os valores elevados de LS aparecem mais fragmentados e espacialmente descontínuos, com maior predominância de valores baixos a intermediários ao longo das encostas. Essa configuração sugere menor comprimento efetivo de rampa e menor acúmulo de energia erosiva, o que se reflete na menor participação relativa da bacia nos quantis mais críticos do fator LS (Tabela 5).

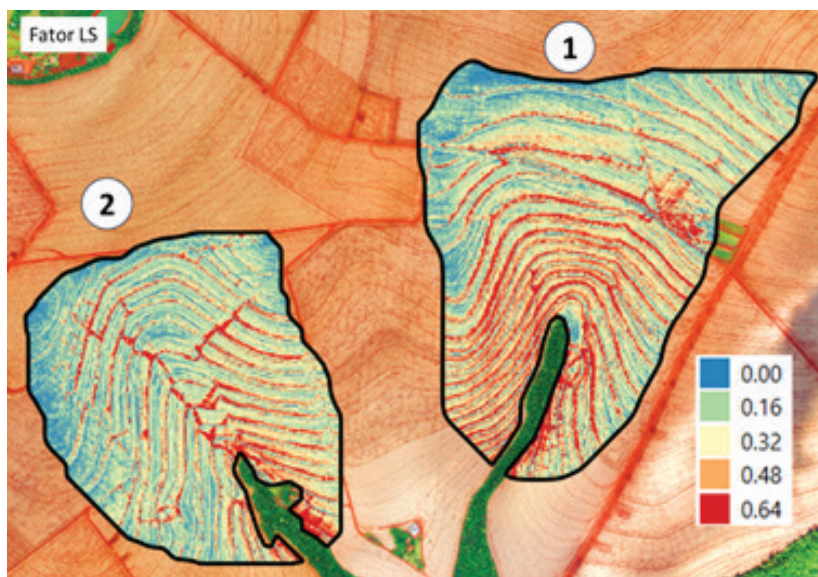


Figura 11. Fator LS nas bacias 1 e 2.

Assim, o mapa apresentado na Figura 11 demonstra que as diferenças estatísticas do fator LS entre as bacias têm base espacial clara, associada à geometria das encostas e à forma como o relevo organiza o escoamento. Em termos funcionais, a bacia 1 apresenta maior predisposição à amplificação dos processos erosivos ao longo das encostas, enquanto a bacia 2 tende a apresentar maior dissipação espacial da energia do escoamento, ainda que limitada por outros moduladores estruturais.

Fator SPI

O SPI, embora estatisticamente significativo, apresenta a menor força de associação ($V = 0,11$) (Tabela 5). Ainda assim, observa-se tendência de maior concentração da bacia 2 nos quantis inferiores e da bacia 1 nos superiores, indicando que, apesar de menos discriminante, o SPI contribui para caracterizar diferenças no potencial energético do escoamento superficial entre as bacias.

O mapa de SPI (Figura 12) evidencia a organização espacial da energia do escoamento superficial, resultante da combinação entre declividade local e área contribuinte. Em ambas as bacias, os maiores valores de SPI concentram-se ao longo das linhas preferenciais de convergência do fluxo, especialmente nas proximidades do talvegue e nos segmentos imediatamente a montante das conexões com o canal.

Na bacia 1, observa-se um padrão mais contínuo e estruturado de SPI elevado, formando corredores bem definidos que acompanham o eixo principal de drenagem e se estendem por longos trechos das encostas. Esse comportamento indica maior capacidade de concentração de energia hidráulica, coerente com a maior participação da bacia nos quantis superiores de SPI identificados na tabela 5 e com os valores mais elevados de associação estatística (χ^2 significativo e V de Cramér mais alto). Em termos funcionais, isso sugere maior potencial de mobilização de sedimentos e maior pressão sobre a capacidade estrutural dos terraços, sobretudo sob cenários compactados.

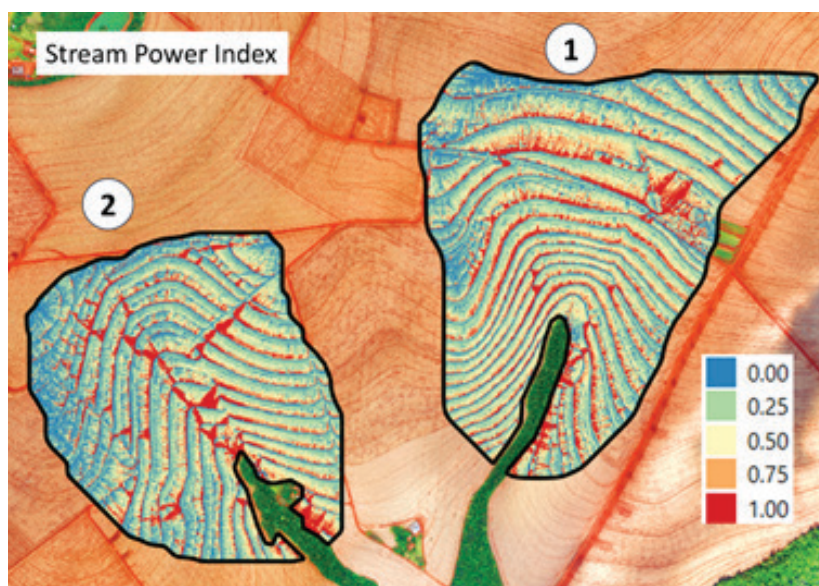


Figura 12. Índice de potência de fluxo nas bacias 1 e 2.

Na bacia 2, embora o SPI também se intensifique nas áreas de convergência, os valores elevados aparecem de forma mais fragmentada e espacialmente descontínua, com maior predominância de classes intermediárias ao longo das encostas. Esse padrão indica que, apesar da existência de trajetórias preferenciais de escoamento, a energia do fluxo tende a se dissipar mais rapidamente, o que se reflete na menor frequência relativa da bacia nos quantis mais elevados de SPI observados na análise tabular (Figura 12 e tabela 5).

A comparação espacial confirma, portanto, que as diferenças estatísticas do SPI entre as bacias têm expressão geomorfológica clara. Enquanto a bacia 1 apresenta maior eficiência na concentração de energia do escoamento, ampliando o risco de falha estrutural quando a capacidade instalada é limitada, a bacia 2 mostra um padrão mais difuso, no qual o SPI exerce papel modulador secundário quando comparado às limitações estruturais e geomorfológicas já identificadas.

Síntese do papel dos moduladores

De forma integrada, os resultados demonstram que a bacia 1 concentra sistematicamente maiores proporções de área nos quantis superiores dos principais moduladores geomorfológicos (Decl, IC e LS), configurando um ambiente estruturalmente mais propenso à intensificação do escoamento superficial e à amplificação de processos erosivos. Em contraste, a bacia 2 apresenta maior predominância de condições mais brandas, associadas a menores declividades, menor conectividade e menores valores de LS. Essa diferenciação estrutural é fundamental para compreender o papel dos moduladores na organização espacial das respostas hidrológicas e fornece a base física para a interpretação das análises de falha, marginalidade e segurança avaliadas posteriormente a partir da variável CA-LES.

Taxa de Infiltração Estável (TIE) e Lâmina de Escoamento Superficial (LES)

A Tabela 6 apresenta a distribuição de frequência, área equivalente e participação percentual dos quantis globais da TIE e da LES para os cenários normal, compactado e melhorado, considerando as duas bacias analisadas. Em todos os casos, os testes de independência indicam diferenças estatisticamente significativas entre as bacias, confirmando forte estruturação espacial das variáveis em função da bacia e do cenário.

Tabela 6. Distribuição espacial dos quantis globais de frequência, área equivalente e participação percentual de TIE e LES nos cenários normal, compactado e melhorado, nas bacias 1 e 2.

Cenário	Quantis globais	Frequência		Área (ha)		%		X ²	V de Cramér	Interpretação
		1	2	1	2	1	2			
Compactado	38	5600	5938	56	59	62	86	1134	0,267	Moderada
	50	3438	963	34	10	38	14			
	58	0	0	0	0	0	0			
	84	0	0	0	0	0	0			
Melhorado	38	0	0	0	0	0	0	2451	0,392	Forte
	50	109	1214	1	12	1	18			
	58	1499	2370	15	24	17	34			
	84	7430	3317	74	33	82	48			
Normal	38	0	421	0	4	0	6	2765	0,416	Forte
	50	2300	3926	23	39	25	57			
	58	6130	1955	61	20	68	28			
	84	608	599	6	6	7	9			

Continua...

Tabela 6. Continuação.

Cenário	Quantis globais	Frequência		Área (ha)		%		X ²	V de Cramér	Interpre- tação
	LES	1	2	1	2	1	2			
Compac- tado	24	0	0	0	0	0	0	1152	0,269	Mode- rada
	27	0	0	0	0	0	0			
	32	3456	962	35	10	38	14			
	43	5582	5939	56	59	62	86			
Melhorado	24	7430	3318	74	33	82	48	2451	0,392	Forte
	27	1500	2369	15	24	17	34			
	32	108	1214	1	12	1	18			
	43	0	0	0	0	0	0			
Normal	24	608	599	6	6	7	9	2765	0,416	Forte
	27	6130	1955	61	20	68	28			
	32	2300	3926	23	39	25	57			
	43	0	421	0	4	0	6			

Observações para interpretação da tabela: Quantis Q1(0-25%), Q2(25-50%), Q3(50-75%) e Q4(75-100%); Frequência: número de pixels em cada quantil; Área: equivalente em área considerando que cada pixel representa 100 m²; Distribuição percentual da área em relação a área total de cada bacia (Figura 2). Teste X² p-valor < 0,001.

TIE: resposta aos cenários e contraste entre as bacias

No cenário compactado, a TIE concentra-se nos quantis inferiores (Q1–Q2), com aproximadamente 62–86% da área associada às classes de menor infiltração (Tabela 6). O V de Cramér (0,267) indica associação moderada, sugerindo que a compactação impõe restrição generalizada à infiltração e tende a reduzir o contraste relativo entre as bacias, embora diferenças estruturais persistam.

No cenário melhorado, ocorre inversão do padrão: a maior parte da área desloca-se para os quantis superiores, com destaque para o último quantil, que representa 48–82% da área, dependendo da

bacia. O V de Cramér (0,392) indica associação forte, evidenciando que, sob melhor condição estrutural do solo, os contrastes intrínsecos entre bacias se tornam mais expressivos.

No cenário normal, a distribuição é intermediária, com predominância dos quantis centrais e superiores e frações ainda presentes nos quantis inferiores. O V elevado (0,416) confirma associação forte, indicando que, mesmo sob condição de referência, a organização espacial da infiltração difere significativamente entre as bacias.

Lâmina de Escoamento Superficial (LES)

A LES reflete de forma coerente e complementar os padrões observados para a TIE, reforçando a relação inversa entre a infiltração e a geração de excedente superficial (Tabela 6). No cenário compactado, a maior parte da área concentra-se nos quantis superiores de LES, com cerca de 56–62% associada a maiores lâminas; o V de Cramér (0,269) indica associação moderada, sugerindo aumento generalizado do excedente e redução do contraste relativo.

No cenário melhorado, ocorre deslocamento para os quantis inferiores, com predominância de lâminas menores. O V (0,392) indica associação forte, evidenciando que a redução do excedente não é homogênea e é modulada por características geomorfológicas e estruturais específicas de cada bacia. No cenário normal, a LES apresenta comportamento intermediário e contraste forte ($V = 0,416$).

Contraste estrutural no cenário normal e implicação para o diagnóstico

No cenário normal, utilizado como referência, as bacias exibem contraste hidrológico estrutural. Para a TIE, a bacia 1 concentra 68% da área no Q3, enquanto a bacia 2 concentra 63% nos quantis inferiores (Q1+Q2), diferença dominante de, aproximadamente, 40 p.p. Para a LES, observa-se comportamento inverso: a bacia 1 concentra 68% em classes de menores lâminas, enquanto a bacia 2 concentra 63% nos quantis superiores (Q3+Q4). Esses resultados evidenciam que as bacias possuem padrões intrínsecos distintos de infiltração

e geração de excedente, os quais antecedem qualquer modificação associada ao manejo.

Distribuição espacial de TIE e LES

A Figura 13 explicita a coerência espacial entre a TIE e a LES nos três cenários. No cenário compactado, predominam baixa TIE e alta LES com continuidade espacial do excedente. No cenário normal, a heterogeneização da TIE reduz a LES, mas persistem setores críticos associados a convergência e conectividade, sobretudo na bacia 2. No cenário melhorado, a LES atinge os menores valores, porém a permanência de manchas de excedente em setores limitantes indica que melhorias hidrológicas ainda podem ser limitantes.

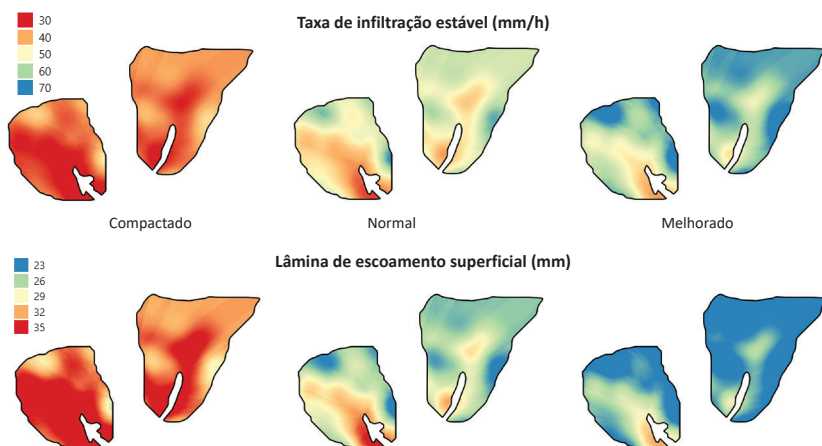


Figura 13. Mapas de TIE e LES, em três cenários de manejo para as bacias 1 e 2.

Do ponto de vista espacial, observa-se que no cenário compactado a bacia 1 apresenta extensas manchas de baixa TIE distribuídas por grande parte da encosta, o que se traduz em LES elevada e relativamente homogênea, enquanto a bacia 2 concentra os maiores

valores de LES de forma ainda mais intensa nas regiões de convergência do escoamento, reforçando o padrão de falha estrutural dominante identificado nas tabelas.

No cenário normal, observa-se uma heterogeneização espacial da TIE, com aumento dos valores intermediários, especialmente nas porções médias e superiores das encostas. Como consequência direta, a LES diminui de forma expressiva, passando a apresentar maior variabilidade espacial. Em termos comparativos, na bacia 1 o aumento da TIE se traduz em redução clara da LES em grande parte da área, mantendo, focos residuais de escoamento elevado, associados às zonas de maior convergência. Na bacia 2, embora haja redução da LES em relação ao cenário compactado, persistem áreas com lâmina elevada, sobretudo próximas ao talvegue, indicando menor eficiência do aumento da infiltração em mitigar o excedente. No cenário melhorado, os mapas mostram valores elevados de TIE amplamente distribuídos, indicando condição hidrológica mais favorável à infiltração. A leitura espacial evidencia que a bacia 1 apresenta ampla redução da LES, com poucas áreas residuais de escoamento concentrado, refletindo elevada eficiência do cenário melhorado em reduzir o excedente hidrológico. A bacia 2, embora também apresente diminuição significativa da LES, mantém manchas persistentes de escoamento relativamente elevado em setores estruturalmente mais limitantes.

Capacidade Estrutural (CA)

A CA foi a variável que mais diferenciou as bacias, com associação forte entre bacia e classes de CA, tanto na condição medida quanto na degradada (Tabela 7). Na condição medida, o contraste é máximo (V de Cramér = 0,502), indicando organizações estruturais intrinsecamente distintas. Na condição degradada, o contraste diminui (V = 0,366), sugerindo homogeneização parcial sob perda de eficiência, sem eliminar as diferenças estruturais.

Tabela 7. Distribuição espacial dos quantis globais de frequência, área equivalente e participação percentual da capacidade de armazenamento dos terraços medida e degradada.

Estrutura	Quantis globais	Frequência		Área (ha)		%		X ²	V de Cramér	Interpretação
		1	2	1	2	1	2			
Medida	19	1842	2147	18	21	20	31	4013	0,502	Forte
	41	3300	681	33	7	37	10			
	72	838	3148	8	31	9	46			
	181	3058	925	31	9	34	13			
Degradada	9	2051	1938	21	19	23	28	2140	0,366	Forte
	22	2559	1425	26	14	28	21			
	42	1225	2757	12	28	14	40			
	143	3203	781	32	8	35	11			

Observações para interpretação da tabela: Quantis Q1(0-25%), Q2(25-50%), Q3(50-75%) e Q4(75-100%); Frequência: número de pixels em cada quantil; Área: equivalente em área considerando que cada pixel representa 100 m²; Distribuição percentual da área em relação a área total de cada bacia (Figura 2). Teste X² p-valor < 0,001.

Distribuição por quantis

Na estrutura medida, a bacia 1 concentra maior proporção de área em classes intermediárias e superiores (Q2 = 37%, Q4 = 34%), enquanto a bacia 2 apresenta baixa participação no Q4 (13%) e concentra-se no Q3 (46%). As diferenças são estatisticamente robustas, evidenciando assimetria estrutural consistente (Tabela 7).

Na estrutura degradada, a bacia 1 mantém predominância no Q4 (35%), enquanto a bacia 2 reduz fortemente sua participação nessa classe (11%) e concentra-se no Q3 (40%). As diferenças nos quantis inferiores tornam-se menores, mas a associação permanece forte (Tabela 7).

A comparação direta entre as duas condições estruturais mostra que a estrutura medida amplifica o contraste entre as bacias, enquanto a degradação tende a atenuar, mas não eliminar as diferenças espaciais. A intensidade da associação diminui de $V = 0,502$ na condição medida para $V = 0,366$ na degradada, enquanto a diferença máxima de área entre bacias nos quantis dominantes reduz-se de, aproximadamente, 37% para cerca de 26%. Esses resultados demonstram que as bacias apresentam organização estrutural distinta, independente da condição de conservação dos terraços.

Organização espacial da CA

Os mapas de CA evidenciam que a diferença entre bacias é também espacial (Figura 14). Na estrutura medida, a bacia 1 tende a apresentar faixas mais contínuas e organizadas de capacidade, coerentes com a distribuição mais equilibrada por classes. Na bacia 2, a CA é mais fragmentada, com baixos valores mais frequentes em setores convergentes e próximos ao eixo de drenagem, enquanto valores altos são mais pontuais e descontínuos. Sob degradação, ambas perdem capacidade, mas a bacia 2 mostra expansão mais pronunciada de baixa CA em setores hidrológicamente estratégicos, reduzindo sua margem operacional.

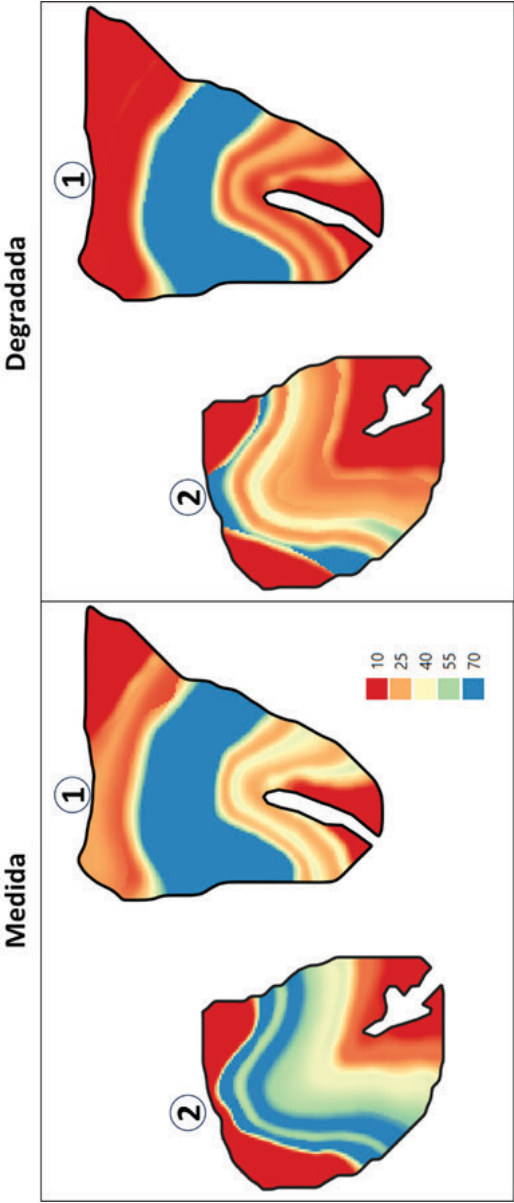


Figura 14. Capacidade de armazenamento de água (mm) (CA), medida e degradada nas bacias 1 e 2. O mapa representa os valores de CA espacializados e ponderados pela CA média dos terraços determinada com os dados vetoriais.

Na estrutura medida, observa-se que a bacia 1 apresenta uma distribuição espacial da CA mais contínua e organizada, com extensas faixas de valores médios a elevados (55–70 mm), ocupando grande parte da vertente e se estendendo transversalmente ao sentido do escoamento. Essas áreas acompanham o arranjo dos terraços, formando superfícies estruturais relativamente homogêneas, com transições graduais entre classes de CA. Essa configuração espacial explica a elevada proporção de área nos quantis intermediários e superiores, bem como a maior estabilidade funcional observada nos cenários normal e melhorado.

Em contraste, a bacia 2 apresenta uma distribuição espacial da CA mais fragmentada e contrastada, com alternância frequente entre faixas de baixa e alta capacidade. Áreas com CA reduzida concentram-se de forma mais contínua ao longo do eixo do talvegue e em setores convergentes, enquanto valores elevados aparecem de maneira mais pontual e descontínua. Esse padrão espacial explica a maior concentração simultânea de áreas nos quantis extremos (31% no Q1 e 46% no Q3), evidenciando uma estrutura menos uniforme e mais dependente da posição topográfica e da geometria local dos terraços.

Na estrutura degradada, os mapas mostram uma redução generalizada da CA em ambas as bacias, porém com respostas espaciais distintas. Na bacia 1, apesar da perda estrutural, ainda se preservam núcleos relativamente extensos de CA intermediária a alta, sobretudo em setores menos convergentes da vertente. A degradação se manifesta como uma redução de magnitude, mas a organização espacial dos terraços permanece reconhecível, o que explica a manutenção de 35% da área no quantil superior mesmo após a degradação. Na bacia 2, por outro lado, a degradação resulta em uma expansão espacial das áreas de baixa CA, especialmente ao longo do talvegue e em setores de maior conectividade. Os valores elevados tornam-se ainda mais restritos e espacialmente isolados. Esse padrão explica o aumento da proporção de área nos quantis inferiores e intermediários (28% no Q1 e 40% no Q3) e a forte redução da área no quantil superior (apenas 11%).

A leitura integrada dos mapas e da tabela evidencia que as diferenças entre as bacias não são apenas quantitativas, mas fundamentalmente espaciais. A bacia 1 apresenta uma CA mais contínua e espacialmente organizada, o que cria uma maior σ frente à LES. Em contraste, a bacia 2 exibe uma CA mais fragmentada e fortemente condicionada pela convergência topográfica, com concentração de baixos valores em setores hidrologicamente estratégicos, como o talvegue e áreas convergentes, o que limita a eficiência funcional do sistema de terraços mesmo quando existem pontos localizados de alta capacidade.

Capacidade Estrutural Relativa

Distribuição contínua da CER e interpretação funcional

A CER ($CA - LES$, mm) representa o balanço direto entre a capacidade estrutural e o excedente superficial sob diferentes combinações de cenário hidrológico e condição estrutural (Figura 15). Valores negativos indicam setores onde o excedente supera sistematicamente a capacidade instalada (deficiência funcional), enquanto valores positivos indicam suficiência estrutural. Entre esses extremos, faixas próximas de zero formam zonas sensíveis, cuja extensão e posição variam conforme cenário e estrutura.

Os mapas revelam a presença de faixas estruturais bem definidas, com valores negativos persistentes de CER concentrados nas porções mais altas e conectadas das bacias, indicando regiões onde o excedente hidrológico supera sistematicamente a CA instalada. Essas áreas permanecem negativas mesmo sob cenários hidrológicos favoráveis, caracterizando deficiência estrutural intrínseca. Em contraste, zonas com valores elevados e positivos de CER organizam-se em faixas concentradas e de menor energia do relevo, indicando suficiência estrutural, com excedente de armazenamento capaz de absorver o escoamento mesmo sob condições adversas.

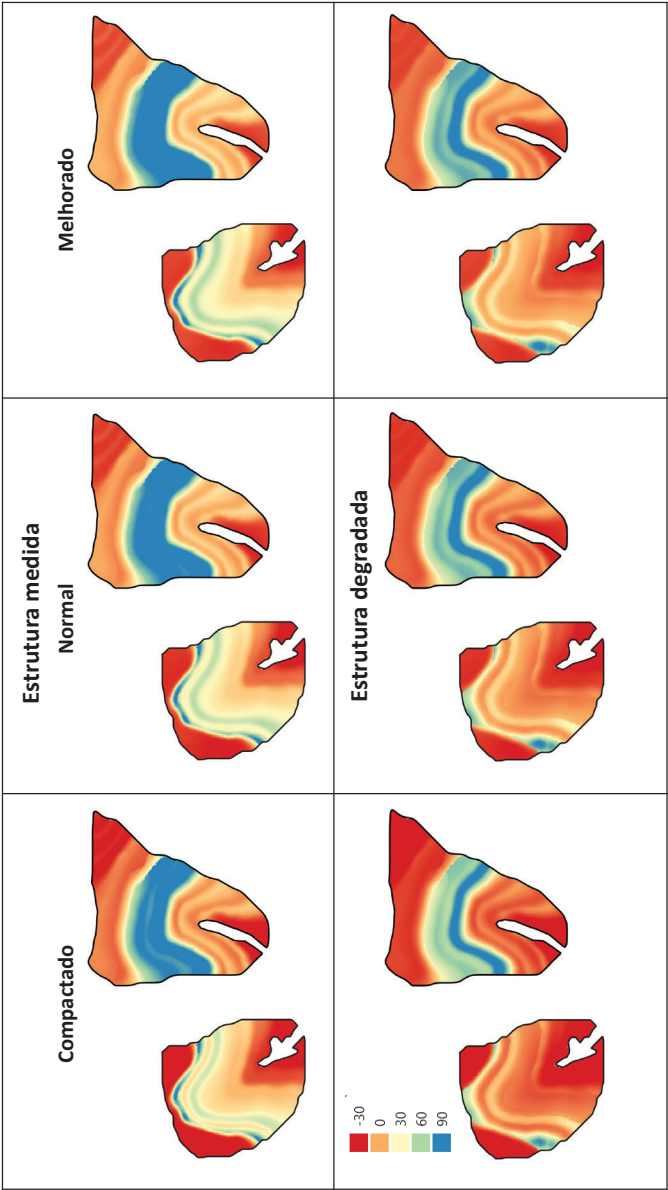


Figura 15. Distribuição espacial da capacidade estrutural relativa (CER) nas bacias 1 e 2 em função dos cenários de manejo e condições estruturais.

Entre esses extremos, observa-se um conjunto de áreas com valores intermediários de CER, espacialmente coerentes, cuja extensão e posição variam conforme os cenários de manejo. Essas regiões representam zonas funcionalmente sensíveis, nas quais o balanço entre CA e LES é fortemente dependente das condições hidrológicas impostas, antecipando a lógica de resposta diferencial que será formalizada na classificação operacional.

Estados operacionais da CER

Para que a CER representasse o balanço espacial entre a CA e a LES, expressando o estado operacional do sistema de terraceamento, foram definidas três classes: falha, marginal e segura. Essa métrica integra, de forma funcional, a infraestrutura instalada e a resposta hidrológica efetiva do sistema.

Neste estudo, o limiar (σ) que define as diferentes classes não representa um valor fixo, mas sim a perda estrutural típica associada à degradação do sistema em cada bacia. Como a morfologia, a organização espacial dos terraços e a distribuição do CA diferem entre as bacias, não há fundamento físico para assumir um mesmo valor de σ para ambas. Assim, a estimativa de σ foi realizada separadamente por bacia, o que é conceitualmente consistente e fisicamente justificado.

A margem σ foi estimada a partir da distribuição de $\Delta CA = CA_M - CA_D$, calculada entre as condições medida e degradada, de modo a representar a perda estrutural elevada, porém recorrente, típica de cada sistema (Tabela 8). O valor de σ foi definido como o percentil P75 da distribuição de ΔCA , resultando em $\sigma_1 = 26$ para a bacia 1 e $\sigma_2 = 32$ para a bacia 2.

Tabela 8. Estatísticas da distribuição ΔCA

Estatística	Bacia1	Bacia2
P25	11	6
P50	14	23
P75	26	32
P100	39	80

A bacia 2 apresentou valores superiores de perda estrutural típica (P50), elevada (P75) e severa (P100), indicando maior sensibilidade à degradação estrutural em comparação à bacia 1. Com base nesses limiares, as classes operacionais finais da CER foram definidas, para cada bacia, como:

- **Falha:** $(CA - LES) < 0$
- **Marginal:** $0 \leq (CA - LES) < \sigma$
- **Segura:** $(CA - LES) \geq \sigma$

Distribuição dos estados operacionais

Com base na organização espacial observada nos dados contínuos, realizou-se a quantificação das proporções de área em cada estado operacional (Tabela 9). Os mapas de CER foram classificados em falha, marginal e segura por meio de expressões condicionais na calculadora raster do QGIS. As proporções de área em cada estado operacional foram então quantificadas para todas as combinações de estrutura (medida e degradada) e cenário hidrológico (compactado, normal e melhorado).

Tabela 9. Distribuição espacial dos quantis globais de frequência, área equivalente e participação percentual do estado operacional em função dos cenários de manejo e condições estruturais.

Estrutura	Cenário	Estado Operacional	Frequência		Area (ha)		%		X ²	V de Cramér	Interpretação
			Bacia 1	Bacia 2	Bacia 1	Bacia 2	Bacia 1	Bacia 2			
Medida	Compactado	Falha	4750	3026	48	30	50	41	1565	0,304	Forte
		Marginal	1475	3031	15	30	15	41			
		Seguro	3361	1300	34	13	35	18			
Medida	Melhorado	Falha	2582	2751	26	28	27	37	230	0,117	Fraca/moderada
		Marginal	3429	2449	34	24	36	33			
		Seguro	3575	2157	36	22	37	29			
Medida	Normal	Falha	3704	2856	37	29	39	39	442	0,162	Moderada
		Marginal	2369	2750	24	28	25	37			
		Seguro	3513	1751	35	18	37	24			
Degrada	Compactado	Falha	6074	5841	61	58	63	79	1897	0,335	Forte
		Marginal	512	1094	5	11	5	15			
		Seguro	3000	422	30	4	31	6			
Degrada	Melhorado	Falha	5240	4419	52	44	55	60	2080	0,35	Forte
		Marginal	1166	2385	12	24	12	32			
		Seguro	3180	553	32	6	33	8			
Degrada	Normal	Falha	5723	5189	57	52	60	71	2027	0,346	Forte
		Marginal	754	1679	8	17	8	23			
		Seguro	3109	489	31	5	32	7			

(Classes: Falha / Marginal / Seguro; $\sigma_1=26$, $\sigma_2=32$). Observações para interpretação da tabela: Quantis Q1(0-25%), Q2(25-50%), Q3(50-75%) e Q4(75-100%); Frequência: número de pixels em cada quantil; Área: equivalente em área considerando que cada pixel representa 100 m²; Distribuição percentual da área em relação a área total de cada bacia (Figura 2). Teste X² p-valor < 0,001.

Estrutura medida

Na estrutura medida, a distribuição das classes operacionais da CER evidenciou diferenças consistentes entre as bacias, cuja magnitude variou em função do cenário hidrológico (Tabela 9). No cenário compactado, a bacia 1 apresentou 50% da área em condição de falha, enquanto a bacia 2 apresentou 41%, resultando em diferença de 9 pontos percentuais. Em contraste, a bacia 2 concentrou 41% da área em condição marginal, frente a 15% na bacia 1, caracterizando uma diferença de 26 pontos percentuais. A condição segura foi mais frequente na bacia 1 (35%) do que na bacia 2 (18%). Esses padrões resultaram em $\chi^2 = 1565$ e V de Cramér = 0,304, caracterizando diferença forte entre as bacias. No cenário normal, a bacia 1 apresentou maior proporção de área segura (37%) em relação à bacia 2 (24%), enquanto a bacia 2 concentrou maior fração de área marginal (37%) em comparação à bacia 1 (25%). Embora a área em falha tenha sido semelhante em ambas as bacias (39%), a redistribuição entre as classes segura e marginal diferiu de forma significativa, resultando em $\chi^2 = 442$ e $V = 0,162$, indicando diferença moderada. No cenário melhorado, observou-se redução do contraste entre as bacias. A bacia 1 manteve elevada estabilidade do estado operacional seguro, com variação mínima entre os cenários (35–37% da área), ao mesmo tempo em que apresentou redução expressiva da condição de falha, que diminuiu de 50% no cenário compactado para 27% no cenário melhorado. Em contraste, a bacia 2 permaneceu com menor proporção de área segura (29%) e maior participação relativa da falha (37%). O valor de $V = 0,117$ caracterizou associação fraca a moderada, indicando que a melhoria estrutural beneficia de forma mais consistente a bacia 1.

Estrutura degradada

Na estrutura degradada, as diferenças entre as bacias tornaram-se mais pronunciadas e consistentes em todos os cenários, com predomínio claro da condição de falha (Tabela 9). No cenário compactado, a bacia 1 apresentou 63% da área em falha, enquanto a bacia

2 alcançou 79%, resultando em diferença de 16 pontos percentuais. A condição segura foi residual na bacia 2 (6%), frente a 31% na bacia 1, caracterizando contraste de 25 pontos percentuais. Esses padrões resultaram em $\chi^2 = 1897$ e $V = 0,335$, indicando diferença forte. No cenário normal, a condição de falha dominou ambas as bacias, mas com maior intensidade na bacia 2 (71%) do que na bacia 1 (60%), diferença de 11 pontos percentuais. A condição segura foi significativamente mais frequente na bacia 1 (32%) do que na bacia 2 (7%). No cenário melhorado, embora tenha havido redução da área em falha, o contraste estrutural permaneceu elevado. A bacia 1 apresentou 55% da área em falha, enquanto a bacia 2 apresentou 60%, e a condição segura permaneceu limitada na bacia 2 (8%) em comparação à bacia 1 (33%). Os valores de $\chi^2 = 2080$ e $V = 0,35$ indicaram novamente diferença forte.

Síntese funcional e implicações

Em termos funcionais, os resultados indicam que a bacia 1 apresenta maior resiliência estrutural e operacional, mantendo proporções elevadas de área segura e reduzindo de forma consistente a condição de falha à medida que os cenários evoluem, enquanto a bacia 2 permanece mais sensível às variações hidrológicas, com maior persistência de áreas em falha ou condição marginal, refletindo limitações estruturais e geomorfológicas que condicionam a eficiência do sistema de terraços.

Espacialização dos estados operacionais da Capacidade Estrutural Relativa (CER)

Os mapas de CER (Figura 16) permitem visualizar de forma explícita a organização espacial dos estados operacionais (falha, marginal e seguro) em função da estrutura do sistema e do cenário hidrológico, complementando diretamente as diferenças quantitativas observadas na Tabela 9.

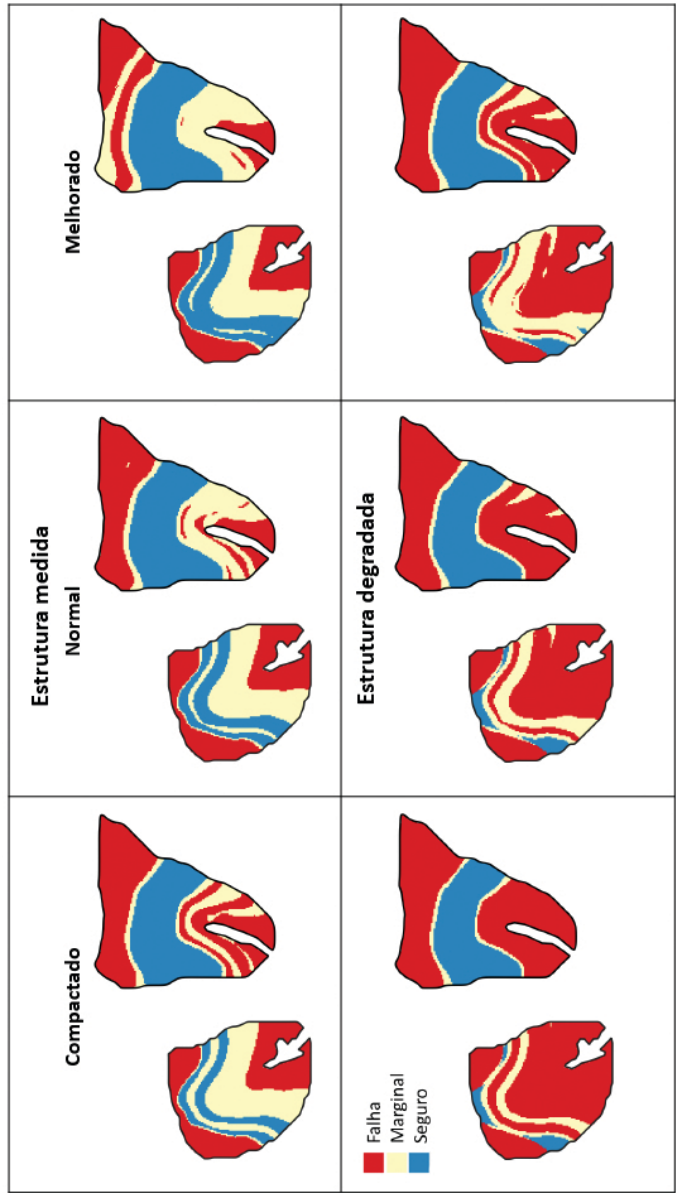


Figura 16. Estados operacionais da Capacidade Estrutural Relativa (CER) nas bacias 1 e 2 sob diferentes cenários hidrológicos e condições estruturais. Mapas da CER classificados em falha ($CA - LES < 0$), marginal ($0 \leq CA - LES < \sigma$) e segura ($CA - LES \geq \sigma$), considerando estrutura medida e degradada e os cenários compactado, normal e melhorado. Os limites σ foram estimados separadamente para cada bacia ($\sigma_1 = 26$; $\sigma_2 = 32$).

Estrutura medida

Na estrutura medida, observa-se que a classe segura ($CER \geq \sigma$) forma faixas contínuas nas porções médias das encostas em ambas as bacias, refletindo setores onde a CA é suficiente para absorver o excedente gerado (Figura 16). No cenário compactado, essas faixas são interrompidas por extensas áreas em falha, especialmente ao longo do eixo do talvegue e nas porções inferiores das encostas, onde a combinação de maior LES e menor CA resulta em valores negativos de CER. Esse padrão espacial explica a elevada proporção de falha observada na bacia 1 (50%) e na bacia 2 (41%), bem como o forte contraste estatístico entre as bacias ($V = 0,304$). No cenário normal, os mapas evidenciam uma redistribuição espacial da CER, pois parte das áreas previamente classificadas como falha passa a integrar a classe marginal, especialmente nas zonas de transição entre as faixas seguras e os setores críticos. Essa reorganização espacial é mais pronunciada na bacia 2, onde a classe marginal se expande de forma contínua ao longo das encostas, coerente com a maior proporção percentual dessa classe (37% contra 25% na bacia 1). Embora a área total em falha seja semelhante entre as bacias, os mapas revelam arranjos espaciais distintos, sustentando a diferença moderada identificada estatisticamente ($V = 0,162$). No cenário melhorado, a estrutura medida da bacia 1 apresenta clara consolidação das áreas seguras, que permanecem espacialmente contínuas e estáveis entre os cenários. Essa estabilidade espacial explica a baixa variação da classe segura (35–37%) e a redução consistente da falha de 50% para 27%. Em contraste, na bacia 2, mesmo com a melhoria do cenário, persistem extensos setores em falha e marginalidade concentrados nas porções inferiores e ao longo do talvegue, resultando em menor proporção de área segura (29%) e em uma associação fraca a moderada entre as bacias ($V = 0,117$).

Estrutura degradada

Na estrutura degradada, os mapas mostram uma mudança qualitativa marcante no padrão espacial da CER. Independentemente do cenário, a classe falha passa a dominar de forma quase contínua

grandes porções das duas bacias, especialmente nas áreas médias e inferiores das encostas. As faixas seguras tornam-se estreitas e fragmentadas, sobretudo na bacia 2, onde praticamente desaparecem em alguns cenários. Esse comportamento espacial explica a persistência de diferenças fortes entre as bacias em todos os cenários degradados (V variando entre 0,335 e 0,350), bem como a elevada proporção de área em falha observada na bacia 2 (até 79% no cenário compactado).

Síntese funcional e implicações

De forma integrada, os mapas de estados operacionais de CER evidenciam que, sob estrutura medida, os cenários hidrológicos controlam a mobilidade espacial entre falha, marginalidade e segurança, reduzindo o contraste entre as bacias à medida que as condições melhoram. Em contraste, sob estrutura degradada, a falha estrutural torna-se espacialmente dominante e pouco sensível aos cenários, amplificando as diferenças intrínsecas entre os sistemas. Assim, a espacialização da CER confirma que a diferença funcional entre as bacias resulta da interação entre a robustez estrutural do sistema de terraços e a capacidade do cenário hidrológico de redistribuir o excedente ao longo da paisagem.

Associação entre a intensidade da falha CER e moduladores morfodinâmicos

Uma vez definida a falha estrutural de forma física e operacional a partir da relação entre a CA e a LES, procedeu-se à análise da associação espacial entre a intensidade da falha (CA–LES) e os principais moduladores morfodinâmicos da resposta hidrológica das bacias: DECL, IC, fator LS e SPI.

Para essa finalidade, a variável CA–LES foi discretizada em três classes com base nos quartis definidos no cenário normal, enquanto os moduladores foram discretizados em quartis globais, adotados exclusivamente para fins de análise estatística. A associação espacial entre as classes foi avaliada por meio de matrizes de contingência

3×3, utilizando o teste do χ^2 e o coeficiente V de Cramér como medida padronizada da intensidade da associação. A Tabela 10 apresenta os valores de V de Cramér obtidos para cada combinação de bacia, cenário hidrológico (compactado, normal e melhorado) e condição estrutural (medida e degradada).

Tabela 10. V de Cramér entre quantis da intensidade da falha (CA–LES) e de moduladores morfodinâmicos, por bacia, cenário e condição estrutural

Bacia	Cenário	Modulador	Condição estrutural	
			Medida	Degradada
Bacia 1	compactado	Decl	0,24	0,26
		IC	0,20	0,22
		LS	0,18	0,20
		SPI	0,10	0,12
	melhorado	Decl	0,13	0,13
		IC	0,12	0,12
		LS	0,10	0,10
		SPI	0,07	0,07
	normal	Decl	0,14	0,17
		IC	0,13	0,15
		LS	0,10	0,11
		SPI	0,07	0,06
Bacia 2	compactado	Decl	0,31	0,37
		IC	0,16	0,17
		LS	0,14	0,17
		SPI	0,09	0,13
	melhorado	Decl	0,28	0,32
		IC	0,17	0,17
		LS	0,16	0,15
		SPI	0,09	0,11
	normal	Decl	0,29	0,38
		IC	0,17	0,19
		LS	0,15	0,17
		SPI	0,09	0,13

De modo geral, observa-se que a estrutura degradada apresenta valores de V sistematicamente superiores à estrutura medida, indicando que a degradação estrutural amplifica o controle morfométrico sobre a intensidade da falha. Esse comportamento é fisicamente coerente, pois a perda de capacidade estrutural reduz a margem hidráulica do sistema, tornando a resposta hidrológica mais diretamente condicionada pelos atributos do relevo e da organização do escoamento (Tabela 10).

Entre os moduladores analisados, estabelece-se de forma consistente a seguinte hierarquia de controle morfodinâmico sobre a intensidade da falha: $DECL > IC > LS > SPI$. A declividade apresentou, em todos os cenários e condições estruturais, os maiores valores de V de Cramér, evidenciando seu papel dominante na organização espacial das áreas em falha, sobretudo sob estrutura degradada (Tabela 10).

As diferenças entre as bacias são marcantes. A bacia 2 apresenta, de forma sistemática, valores de V superiores aos da bacia 1, especialmente para a declividade, indicando que seu funcionamento hidrológico é mais fortemente controlado por fatores morfométricos. No cenário normal, por exemplo, os valores de V associados à declividade atingem aproximadamente 0,29–0,38 na bacia 2, enquanto permanecem em torno de 0,14–0,17 na bacia 1, evidenciando que a primeira é estruturalmente mais sensível à degradação e opera mais próxima de um regime crítico.

Na bacia 1, os valores moderados de V , especialmente sob estrutura medida, indicam que a infraestrutura de terraceamento exerce efeito amortecedor, reduzindo a influência direta do relevo sobre a intensidade da falha. Esse comportamento é compatível com a maior resiliência estrutural observada nos mapas de CER e na distribuição dos estados operacionais. Algumas exceções pontuais merecem destaque. Em cenários melhorados, especialmente para os moduladores SPI e LS, observam-se casos em que os valores de V na estrutura medida são semelhantes ou ligeiramente superiores aos da estrutura degradada. Esse comportamento não indica melhora estrutural, mas sim redução do poder explicativo desses moduladores sob maior infiltração, uma vez que índices baseados em fluxo concentrado (SPI) ou

comprimento efetivo de rampa (LS) tornam-se menos determinantes quando o excedente superficial é reduzido pelo manejo.

Em síntese, a análise de V de Cramér demonstra que, embora a falha estrutural seja definida fisicamente pela relação CA-LES, sua organização espacial é fortemente condicionada por moduladores morfodinâmicos, cujo papel é amplificado pela degradação estrutural. As diferenças sistemáticas entre as bacias confirmam que elas são funcionalmente distintas. A bacia 1 apresenta maior capacidade de amortecimento estrutural e a bacia 2 operando sob controle morfo-métrico mais intenso, especialmente da declividade, o que explica a maior persistência e concentração espacial das áreas em falha.

Tipologia espacial e funcional das falhas da CER

A tipologia espacial das falhas da CER evidencia que os estados operacionais se organizam em padrões geomorfológicos recorrentes, fortemente associados às zonas de convergência do escoamento e à conectividade hidrossedimentológica do sistema. Observa-se que, embora a extensão das falhas varie conforme o cenário hidrológico e a condição estrutural, sua organização espacial é consistente, indicando que a ocorrência da falha é controlada por fatores estruturais e geomorfológicos persistentes. Esses padrões são mais extensos e contínuos na bacia 2, corroborando sua maior vulnerabilidade estrutural e menor responsividade às melhorias de cenário identificadas na análise da CER.

A tipologia espacial das falhas da CER foi derivada a partir da classificação pixel a pixel do balanço CA - LES, previamente categorizado nos estados operacionais de falha, marginal e seguro, utilizando limiares físicos definidos por bacia. Para cada combinação de estrutura (medida e degradada) e cenário hidrológico (compactado, normal e melhorado), os mapas de CER foram reclassificados em classes discretas e, em seguida, analisados quanto à sua organização espacial. A tipificação das falhas baseou-se exclusivamente na

persistência espacial e na recorrência dos estados de falha ao longo dos diferentes cenários, permitindo distinguir padrões estruturais consistentes daqueles induzidos apenas por variações hidrológicas. Dessa forma, áreas que permaneceram sistematicamente em condição de falha, independentemente do cenário, foram interpretadas como falhas estruturalmente controladas, enquanto áreas que migraram entre os estados de falha, marginalidade e segurança refletiram maior sensibilidade às condições hidrológicas. Essa abordagem permitiu identificar modos espaciais recorrentes de falha do sistema de terraceamento, associados à morfologia do relevo, à conectividade do escoamento e à distribuição da CA, fornecendo uma interpretação funcional complementar à análise quantitativa da CER e reforçando o papel dos controles geomorfológicos na eficiência do sistema.

Tipologia funcional dos estados operacionais da CER

A tipologia funcional apresentada na figura 16 classifica o comportamento do balanço CA – LES a partir da persistência ou alternância dos estados operacionais sob diferentes cenários hidrológicos (compactado, normal e melhorado). As classes são representadas pelas cores vermelho, azul e amarelo, cada uma associada a mecanismos funcionais distintos, definidos de forma consistente com os critérios estabelecidos na tabela de tipificação.

As áreas em vermelho correspondem às zonas que permanecem em condição de falha estrutural em todos os cenários avaliados. Essa persistência indica insuficiência estrutural intrínseca, na qual a CA instalada é sistematicamente inferior ao excedente hidrológico gerado, independentemente das condições de manejo ou do cenário hidrológico imposto. Do ponto de vista funcional, o vermelho caracteriza a falha estrutural propriamente dita, associada ao subdimensionamento do sistema de terraceamento e/ou a uma organização geomorfológica desfavorável. Nessas áreas, intervenções baseadas exclusivamente em manejo do solo não são capazes de alterar o estado operacional, sendo necessárias intervenções estruturais diretas, como redimensionamento, redistribuição ou reconfiguração dos terraços.

As áreas em azul representam zonas que permanecem em condição segura mesmo sob cenários hidrológicos desfavoráveis. A estabilidade dessa classe indica que a capacidade estrutural instalada é suficiente, operando com margem elevada em relação à LES. Funcionalmente, o azul identifica áreas estruturalmente robustas, nas quais o sistema de terraceamento apresenta elevada resiliência hidrológica. Nesses setores, o manejo exerce influência secundária sobre o estado operacional, uma vez que a infraestrutura instalada é capaz de absorver o excedente mesmo sob maior pressão hidrológica. Trata-se, portanto, de zonas com segurança estrutural consolidada.

As áreas em amarelo correspondem às zonas que alternam entre os estados seguro, marginal ou falha em função dos cenários hidrológicos e da atuação dos moduladores topográficos (declividade, conectividade, fator LS e SPI). Diferentemente do vermelho, o amarelo não representa falha estrutural permanente, mas sim uma condição de equilíbrio próximo ao limiar operacional. Do ponto de vista funcional, essa classe indica que a capacidade estrutural instalada é adequada, porém limitada, situando-se próxima ao valor crítico σ . Pequenas variações na LES - controladas tanto pelo manejo do solo quanto pelos moduladores geomorfológicos - são suficientes para deslocar o sistema entre estados operacionais. Assim, o amarelo representa áreas altamente responsivas ao manejo, estruturalmente viáveis, nas quais práticas conservacionistas apresentam alto potencial de eficácia, embora a segurança não seja garantida de forma permanente.

Implicações espaciais e funcionais

A análise integrada da tipologia espacial da CER demonstra que, embora o manejo possa reduzir a extensão das áreas em falha e promover transições favoráveis em setores marginais, a localização e a recorrência das falhas estruturais são fortemente controladas por fatores geomorfológicos persistentes. Esses padrões são mais extensos e contínuos na bacia 2, corroborando sua maior vulnerabilidade estrutural e menor responsividade às melhorias de cenário

identificadas na análise quantitativa da CER. Em conjunto, os resultados indicam que a eficiência do sistema de terraceamento resulta da interação entre capacidade estrutural instalada, organização geomorfológica e condições hidrológicas, sendo a tipologia espacial da CER uma ferramenta poderosa para distinguir áreas que demandam intervenções estruturais prioritárias daquelas em que o manejo do solo é suficiente para melhorar o desempenho funcional do sistema.

Condição sem terraços como limite teórico de falha estrutural

A condição sem terraços ($CA = 0$) representa, no presente estudo, um limite teórico de falha estrutural do sistema. Nessa situação, toda a LES constitui excedente não controlado, resultando em valores de $CA-LES$ negativos em toda a área da bacia. Trata-se, portanto, de uma condição de falha generalizada, independente da configuração geomorfológica local ou do cenário hidrológico considerado. Por não apresentar variabilidade espacial de estados operacionais — uma vez que toda a área se encontra em falha — a condição sem terraços não foi incluída nas análises estatísticas comparativas entre bacias. Seu papel no estudo é estritamente conceitual, funcionando como referência extrema para interpretação da eficiência relativa das condições com capacidade estrutural instalada.

A comparação entre os cenários com estrutura medida ou degradada e a condição sem terraços evidencia que a presença de capacidade estrutural é condição necessária para qualquer mitigação do risco hidrológico. Mesmo sob cenários hidrológicos favoráveis, a ausência de estrutura implica falha inevitável do sistema, reforçando que os moduladores geomorfológicos e a TIE apenas redistribuem o risco quando existe uma base estrutural mínima capaz de absorver o excedente.

Nesse contexto, a tipificação espacial das falhas observadas nas condições com terraços pode ser interpretada como a expressão

residual de um sistema que, na ausência de estrutura, falharia integralmente. Assim, o cenário sem terraços fornece o enquadramento conceitual necessário para compreender a gênese, a persistência e a organização espacial das falhas estruturais observadas nas demais condições.

Os resultados também mostram que a influência dos moduladores geomorfológicos é mais evidente na espacialização das áreas falhas e marginais, enquanto as áreas estruturalmente seguras permanecem pouco sensíveis às variações locais de relevo. Assim, os moduladores controlam o padrão espacial da falha, enquanto a estrutura e a TIE controlam o estado operacional do sistema.

A diferenciação entre bacias emerge da interação entre estrutura geomorfológica, capacidade estrutural e cenário hidrológico, sendo a capacidade estrutural o principal fator de controle da robustez do sistema. Para finalizar, a ausência de terraços não constitui uma alternativa discutível sob a ótica da segurança hídrica. Os resultados mostram que, mesmo nos cenários mais favoráveis de manejo, a geração de excedente hidrológico (LES) persiste e, sem capacidade estrutural instalada ($CA = 0$), esse excedente permanece integralmente não controlado, tornando a falha inevitável e mantendo o potencial de desencadear escoamento concentrado e erosão hídrica em toda a bacia.

Conclusões

Os resultados demonstram que a capacidade estrutural dos terraços é o principal fator discriminante entre as bacias analisadas, superando métricas topográficas isoladas e condicionando de forma decisiva a resposta hidrológica expressa pela LES e pela TIE. A compactação do solo tende a homogeneizar parcialmente o comportamento hidrológico entre bacias, reduzindo o contraste relativo,

enquanto a degradação estrutural mantém diferenças fortes e persistentes, independentemente do cenário hidrológico considerado.

A análise integrada baseada na diferença CA – LES evidencia que a robustez funcional do sistema de terraceamento depende simultaneamente da integridade estrutural e do contexto hidrológico, reforçando que o manejo conservacionista atua como elemento central na mitigação do risco hidrológico e erosivo, mas somente quando associado a uma capacidade estrutural mínima efetiva.

De forma sintética, os principais achados podem ser organizados da seguinte maneira:

- A TIE constitui a variável primária de controle da geração do excedente superficial, enquanto a LES representa a resposta hidrológica derivada da interação entre infiltração, precipitação e organização do relevo.
- Declividade (DECL), IC, fator LS e SPI atuam como moduladores geomorfológicos, condicionando a organização espacial do excedente hidrológico e das falhas, sem, contudo, alterar a capacidade estrutural instalada do sistema.
- A abordagem integrada baseada na diferença CA – LES permite identificar estados operacionais de falha, marginalidade e segurança de forma fisicamente interpretável, superando análises baseadas apenas em limiares fixos ou métricas isoladas.
- As falhas estruturais são determinadas pela insuficiência da capacidade estrutural frente ao excedente gerado, enquanto os moduladores geomorfológicos explicam a localização e a persistência espacial dessas falhas ao longo da paisagem.
- O arcabouço metodológico proposto fornece uma base robusta, integrada e operacional para a avaliação do risco hidrológico em bacias agrícolas, combinando medições de campo, modelagem hidrológica e análise geomorfológica, com potencial aplicação direta no diagnóstico, priorização de intervenções e planejamento conservacionista em escala de bacia.

Agradecimentos

À Itaipu Binacional pelo financiamento do projeto 725 - Faped/Itaipu/Embrapa Soja - Convênio N° 4500059808, denominado “Inovações na abordagem temática para a conservação de solo e água em bacias hidrográficas no entorno da Represa de Itaipu”, cujas ações de pesquisa deram origem a este trabalho.

Lista de siglas e símbolos

CA: Capacidade de Armazenamento de Água dos Terraços

CER: Capacidade Estrutural Relativa

DECL: Declividade

IC: Índice de Conectividade

LES: Lâmina de Escoamento Superficial

LS: Fator que integra comprimento de rampa e declividade

MDE: Modelo Digital de Elevação

RTK: Real Time Kinematic

SAGA: System for Automated Geoscientific Analyses

SIG: Sistemas de Informação Geográfica

SPI: Índice de Potência de Escoamento

TIE: Taxa de Infiltração Estável

σ : Margem Operacional

Referências

- BAARTMAN, J. E. M.; MASSELINK, R.; KEESSTRA, S.; TEMME, A. J. A. M. Linking landscape morphological complexity and sediment connectivity. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 38, n. 12, p. 1457-1471, 2013.
- BORSELLI, L.; CASSI, P.; TORRI, D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment. **Catena**, v. 75, p. 268-277, 2008.
- CASTILLO, V. M.; GÓMEZ-PLAZA, A.; MARTÍNEZ-MENA, M. The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: a simulation approach. **Journal of Hydrology**, v. 284, p. 114-130, 2003.
- CAVALLI, M.; TREVISANI, S.; COMITI, F.; MARCHI, L. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. **Geomorphology**, v. 188, p. 31-41, 2013.
- DWIVEDI, D.; POEPPL, R. E.; WOHL, E. Hydrological connectivity: a review and emerging strategies for integrating measurement, modeling, and management. **Frontiers in Water**, v. 7, 1496199, 2025.
- FRANCHINI, J. C.; LEONARDO, H. C. L.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; DEBIASI, H.; SANTOS, E. L. **Geotecnologias e infiltração de água no solo aplicadas ao redimensionamento de terraços em uma bacia hidrográfica na região oeste do Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2025. 66 p. (Embrapa Soja. Documentos, 480).
- HECKMANN, T.; CAVALLI, M.; CERDAN, O.; FOERSTER, S.; JAVAUX M.; LODE, E.; SMETANOVA, A.; VERICAT, D.; BRARDINONI, F. Indices of sediment connectivity: opportunities, challenges and limitations. **Earth-Science Reviews**, v. 187, p. 77-108, 2018.
- HERWEG, K.; LUDI, E. The performance of selected soil and water conservation measures - case studies from Ethiopia and Eritrea. **Catena**, v. 36, p. 99-114, 1999.

KESSTRA, S.; NUNES, J. P.; SACO, P.; PARSONS, T.; POEPPL, R.; MASSELINK, R. CERDA, A. The way forward: can connectivity be useful to design better measuring and modelling schemes for water and sediment dynamics? **Science of the Total Environment**, v. 644, p. 1557-1572, 2018.

MASSELINK, R. J. H.; HECKMANN, T.; TEMME, A. J. A. M.; ANDERS, N. S.; GOOREN, H. P. A.; KESSTRA, S. A network theory approach for a better understanding of overland flow connectivity. **Hydrological Processes**, v. 31, p. 207-220, 2017.

MEKONNEN, M.; KESSTRA, S. D.; BAARTMAN, J. E. M.; STROOSNIJDER, L.; MAROULIS, J. Reducing sediment connectivity through man-made and natural sediment sinks in the Minizir catchment, Northwest Ethiopia. **Land Degradation & Development**, v. 28, p. 708-717, 2017.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M. **Vesper version 1.62**. Sydney: Australian Centre for Precision Agriculture, 2005.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation**. 3rd ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2005. 304 p.

NYSSSEN, J.; CLYMANS, W.; DESCHEEMAER, K.; POESEN, J.; VANDECASTEELE, I.; VANMAERCKE, M.; ZENEBE, A.; CAMP, M. V.; MITIKU, H.; HAREGEWEYN, N.; MOEYERSONS, J.; MARTENS, K. GEBREYOHANNES, T.; DECKERS, J.; WALRAEVEN, K. Impact of soil and water conservation measures on catchment hydrological response - a case in northern Ethiopia. **Hydrological Processes**, v. 24, p. 1880-1895, 2010.

POEPPL, R. E.; KESSTRA, S. D.; MAROULIS, J. A conceptual connectivity framework for understanding geomorphic change in human-impacted fluvial systems. **Geomorphology**, v. 277, p. 237-250, 2017.

PRUSKI, F. F.; FERREIRA, P. A.; RAMOS, M. M.; CECON, P. R. Model to design level terraces. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 123, n. 1, p. 8-12, 1997.

SERATTO, C. D.; FRANCHINI, J. C.; SERATTO, F. R.; DEBIASI, H.; SANTOS, E. L. dos; CONTE, O.; MORALES NETO, S.; BRISCHILIARI, V. **Infiltrômetro de aspersão de Cornell aperfeiçoado: aspectos construtivos, operacionais e de manutenção**. Londrina: Embrapa Soja, 2019. 66 p. (Embrapa Soja. Documentos, 424).

