

Estimativa do Número da Curva (CN) e sua adaptação ao contexto das Paisagens Mineiras

DOI: 10.20396/labore.v18i00.8673566

Cláudia Campos de Albuquerque

<https://orcid.org/0009-0008-7993-8822>

Universidade Federal de Minas Gerais / Belo Horizonte [MG] Brasil

Maria Carolina Oliva Brasil

<https://orcid.org/0000-0003-4686-3314>

Universidade Federal de Minas Gerais / Belo Horizonte [MG] Brasil

Nelson Pedro Antonio Mateus

<https://orcid.org/0000-0001-7532-5772>

Universidade Federal de Minas Gerais / Belo Horizonte [MG] Brasil

Diego Rodrigues Macedo

<https://orcid.org/0000-0002-1178-4969>

Universidade Federal de Minas Gerais / Belo Horizonte [MG] Brasil

Sônia Maria Carvalho Ribeiro

<https://orcid.org/0000-0002-3045-8632>

Universidade Federal de Minas Gerais / Belo Horizonte [MG] Brasil

RESUMO

Os recursos hídricos são essenciais para a manutenção da vida e da dinâmica terrestre. Para entender as dinâmicas entre recursos hídricos e uso do solo em diferentes paisagens as análises espaciais são ferramentas valiosas. Uma das metodologias amplamente utilizadas é o *Soil Conservation Service* (SCS), que se baseia no coeficiente do Número da Curva (CN), dentre outros parâmetros. No entanto, o método e a estimativa do coeficiente CN foi desenvolvida para um contexto de paisagem específico nos Estados Unidos, e não é necessariamente adequada para outras áreas. Adaptar o coeficiente CN para o contexto do estado de Minas Gerais, pode auxiliar no estudo e caracterização da hidrologia nas paisagens do estado, contribuindo para incluir recursos hídricos na gestão da paisagem. Este trabalho usou o CN tabulado pelo SCS e refinou o coeficiente para o contexto específico de Minas Gerais, usando álgebra de mapas e dados espaciais sobre a hidrodinâmica da região. Como resultado, foram desenvolvidos um mapa de CN tabulado e um mapa de CN refinado adaptado para o estado de Minas Gerais. A validação ocorreu com informações hidrológicas da bacia do Rio Doce. A estimativa de CN para valores altos indica locais de escoamento superficial alto e baixa infiltração. O CN tabelado acima de 70 representa 84 % da área total do estado de Minas Gerais. Já as estimativas para o CN refinado mostram que 65% da área total do estado possui CN acima 80. Valores do CN tabulado e refinado foram comparadas e validadas. Este estudo destaca a importância de adaptar as metodologias existentes às condições das paisagens locais contribuindo para dar subsídios para atingir metas globais como Objetivos do Desenvolvimento Sustentável ODS 6 (Garantir disponibilidade e manejo sustentável da água e saneamento para todos), ODS 11 (Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis) e ODS 15 (Proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda de biodiversidade).

PALAVRAS-CHAVE

Número da Curva. Recursos Hídricos. Modelos Hidrológicos. Unidades de Paisagem. Álgebra mapas.

Curve Number (CN) estimate and its adaptation to Minas Gerais landscapes

ABSTRACT

Water resources are essential for the maintenance of life and terrestrial dynamics. To understand the dynamics between water resources and land use in different landscapes, spatial analyzes are valuable tools. One of the widely used methodologies is the *Soil Conservation Service* (SCS), which is based on the Curve Number (CN) coefficient, among other parameters. However, the method and estimation of the CN coefficient was developed for a specific landscape context in the United States, and is not necessarily suitable for other areas. Adapting the CN coefficient to the context of the state of Minas Gerais can assist in the study and characterization of hydrology in the state's landscapes, contributing to including water resources in landscape management. This work used the CN tabulated by SCS and refined the coefficient for the specific context of Minas Gerais, using map algebra and spatial data on the hydrodynamics of the region. As a result, a tabulated CN map and a refined CN map adapted for the state of Minas Gerais were developed. Validation took place with hydrological information from the Rio Doce basin. The CN estimate for high values indicates locations of high surface runoff and low infiltration. The CN above 70 represents 84% of the total area of the state of Minas Gerais. Estimates for refined CN show that 65% of the state's total area has CN above 80. Tabulated and refined CN values were compared and validated. This study highlights the importance of adapting existing methodologies to the conditions of local landscapes, contributing to providing support to achieve global goals such as Sustainable Development Goals SDG 6 (Ensure availability and sustainable management of water and sanitation for all), SDG 11 (Make cities and inclusive, safe, resilient and sustainable human settlements) and SDG 15 (Protect, restore and promote the sustainable use of terrestrial ecosystems, sustainably manage forests, combat desertification, halt and reverse land degradation and halt the loss biodiversity).

KEYWORDS

Curve Number. Water Resources. Hydrologic Models. Landscape Units. Map Algebra.

1. Introdução

Os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS's) são globais e incluem metas de envolvimento relacionadas a cinco eixos: pessoas, planeta, prosperidade, paz e parceria, com o prazo de 2030 para a conexão econômica, social e ambiental entre as partes interessadas (ONU 2015).

Para atingir estes objetivos é necessário promover desenvolvimento sustentável aliando conservação do ambiente e desenvolvimento socioeconômico. Por isso, gerir paisagens impactadas por ações antrópicas tem sido alvo de ações conjuntas, por exemplo no âmbito da década da restauração, fomentando a participação de diversos atores e alinhando as ações tanto do poder público quanto da sociedade em geral com as premissas do desenvolvimento sustentável.

Nesse sentido, a disciplina de Gestão Integrada da Paisagem, tem se tornado essencial para o entendimento e planejamento em diferentes escalas espaciais e temporais (Carvalho Ribeiro et al. 2021). Nesse contexto, se tratando de áreas já impactadas existe uma necessidade em não apenas mitigar os impactos e preservar os serviços ecossistêmicos remanescentes, como também entender a dinâmica do sistema e a extensão dos danos ambientais nos diversos componentes do sistema ambiental.

Estes sistemas ambientais, como definem Dalbem et al. (2005), podem ser entendidos como um espaço geográfico onde os aspectos físicos, químicos e biológicos, naturais e antrópicos, influenciam na construção de uma dinâmica que se manifesta territorialmente. Ou seja, as particularidades dos componentes devem ser avaliadas com relação ao potencial de impactar o sistema em sua totalidade.

Entender a dinâmica dos sistemas ambientais é desafiador, dadas as interações, múltiplas relações e camadas. Christofolletti (1999) reforça a complexidade e multidisciplinaridade que constitui a análise dos sistemas ambientais. Para lidar com isso, as ferramentas de análise espacial e modelagem surgem como facilitadores da representação destas dinâmicas, permitindo a representação dos sistemas a partir de simplificações e observações. Porém, torna-se necessário a inserção da percepção de especialistas de múltiplas disciplinas para fazer ponderações e construir modelos capazes de representar de forma consistente os processos em análise.

Segundo Dalbem et al. (2005), no âmbito da análise de paisagens por meio da sistematização, a identificação de áreas relativamente homogêneas, as denominadas Unidades de Paisagem, tem sido um poderoso instrumento. As Unidades de Paisagem podem ser caracterizadas pela homogeneidade e pela funcionalidade, sendo a caracterização física a base de ambas (Cervantes-Borja and Alfaro-Sánchez 1998).

Trabalhar à escala de Unidade de Paisagem com abordagem funcional permite a aplicação de ferramentas de gestão da paisagem com eficiência, otimizando os resultados e os processos ecológicos. Contudo, a identificação destas funcionalidades depende da caracterização da estrutura, composição e entendimento da dinâmica existente (Beroutchachvili and Bertrand 1978; Cestaro et al. 2007; Britto and Ferreira 2011).

De acordo com o MMA (2017), gerir as paisagens brasileiras de forma integrada, com ações baseadas em dados e pesquisas, incorporando a participação de todos os atores sociais nos processos decisórios é o caminho a ser seguido, com o foco no desenvolvimento sustentável.

Por isso, gerir a paisagem contempla gerir todos os seus componentes e recursos, entendendo a relação e a dinâmica entre eles, o ambiente em sua completude e complexidade. Dentre os recursos essenciais presentes nas paisagens e de suma importância para as análises ambientais, estão os recursos hídricos. Autores dedicados ao estudo de paisagens como Dalbem et al. (2005) e Carvalho Ribeiro et al. (2021) corroboram com esta afirmativa, e reforçam a essencialidade dos recursos hídricos para o funcionamento dos sistemas ambientais e das paisagens.

Tucci (1997), aponta que entender os processos hidrológicos, que envolvem a disciplina de hidrologia, ou seja, a ocorrência, distribuição e movimentação de água no planeta, é fundamental para uma boa gestão ambiental, tanto pela importância dos recursos hídricos quanto por sua vulnerabilidade.

Dessa forma, os recursos hídricos são fundamentais nos processos decisórios, de gestão e na própria formação de unidades de paisagem, pois, conforme ressalta Canholi (2014), não apenas são um componente físico essencial como também influenciam de forma direta todo o ecossistema, sendo a dinâmica hídrica e disponibilidade de água essenciais para o desenvolvimento biológico e antrópico.

Tendo em vista a essencialidade destes recursos, o entendimento do regime hídrico se torna uma ferramenta para interpretação da composição da paisagem, além da oportunidade atual de mapear a distribuição das águas visando simulações e identificação de regiões homogêneas.

No âmbito da modelagem hidrológica, o Número da Curva (Curve Number-CN, em inglês) se difundiu por representar de maneira simplificada e, segundo Jin et al. (2003) e Zhang et al. (2003), eficiente, os processos de fluxo hídrico. O CN tem sido usado para a avaliação produção de água (Jacobs and Srinivasan 2005; Cao et al. 2011), planejamento de medidas de conservação (Feitosa et al. 2010), gestão hídrica (Gao et al. 2006; Calzavara and Fernandez 2015), prevenção de aporte de sólidos em cursos d'água (Machado 2002; Azizah et al. 2022), avaliação do risco às inundações (Bussi et al. 2010; Herrera-Sánchez and Navarro-Bermúdez 2021) e entendimento geral da dinâmica hídrica de bacias.

Sendo um importante dado de entrada para os modelos, o CN deve representar de maneira realística os processos de cada área em estudo, o que, de acordo com Carvalho e Rodrigues (2021), pode ser alcançado a partir da adaptação dos métodos tabelados de CN a cada contexto com auxílio de ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e estatística.

O IGAM (2020) indica que no estado de Minas Gerais têm sido realizados diagnósticos voltados ao entendimento dos sistemas hídricos de maneira holística para direcionar as ações públicas para as questões de maior criticidade, porém ainda não existem dados para o coeficiente CN refinados para o contexto do estado.

Desta forma, o presente estudo visa adaptar o coeficiente CN de forma espacialmente explícita para o contexto do estado de Minas Gerais, gerando uma base de dados concisa e representativa para caracterizar o regime de escoamento nas paisagens de Minas Gerais.

2. Metodologia

2.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi conduzido para o estado de Minas e validado na bacia do Rio Doce e sua sub-bacia, do Rio Piranga. A primeira possui 86.715 km² de área de drenagem, e destes 86% pertencem ao estado de Minas Gerais, estando o restante localizado no Espírito Santo. Já a segunda localizada no Alto Doce, possui uma área total de 17.562,49 km², o que corresponde a cerca de 24,65% da área da Bacia do Rio Doce.

As sub-bacias dos rios Piranga e Piracicaba possuem o maior Produto Interno Bruto (PIB) industrial da Bacia do Rio Doce e concentram cerca de 48% da população total da bacia. Na Bacia Hidrográfica do Rio Doce observa-se uma matriz econômica diversificada, com extensas áreas atividades agropecuárias, inclusive com presença de agroindústrias, minerações, indústrias de celulose e laticínios, comércios e serviços em geral e áreas voltadas à geração de energia elétrica.

De acordo com o monitoramento histórico, a precipitação média anual varia de 1.500 mm (nas nascentes dos cursos) a 900 mm (na divisa de estados), voltando à maiores índices pluviométricos no ES. A distribuição anual das chuvas indica que a maior parte do volume é precipitado entre os meses de outubro e março.

A sub-bacia do Rio Piranga possui características similares às destacadas para a Bacia do Rio Doce, havendo tendências de uso do solo que indicam aumento da antropização, principalmente pelo aumento das atividades minerárias. Além disso, a sub-bacia do Piranga tem tomado iniciativas com relação à gestão de recursos hídricos com objetivo de minimização de eventos extremos, conforme observado nas pautas de reuniões de seu comitê de bacia.

2.2. LEVANTAMENTO DE DADOS

Inicialmente foi calculado e mapeado o CN pelo método usual de tabelas, tanto para servir como base do refinamento quanto para comparativo dos resultados obtidos para o estado de Minas Gerais. O método tabelado se baseia no tipo de solo e no uso e cobertura da terra (para detalhes consultar material suplementar). Para o uso e cobertura da terra foram utilizados os dados do IBGE de 2018 (resolução 30 m e escala 1:1.000.000), e para os tipos de solo foi feito o enquadramento dos tipos de solo da pedologia simplificada do estado nos quatro grupos hidrológicos de solo do método do SCS. Para isso, a descrição dos tipos de solo do mapa de solos de MG, elaborado pela UFLA, foi relacionada com estes grupos hidrológicos (Sartori 2004), gerando um mapa de solos dentro dos grupos requeridos pelo método.

Para o refinamento dos valores de CN, foram utilizados os dados do IDE-Sisema que pudessem representar o contexto do estado e tivessem representatividade para serem incorporados na análise do regime hidrológico. Para este estudo foram selecionadas as camadas (1) Qualidade Ambiental; (2) Exposição do Solo; (3) Vulnerabilidade Natural; (4) Intensidade Média das Chuvas; (5) Atividades Econômicas; e (6) Densidade de Ocupação Econômica.

Paras as etapas de validação foram utilizados os dados: precipitação e vazões observadas da base de dados das estações de monitoramento da ANA, dados físicos da bacia extraídos dos arquivos em formato shapefile da área de estudo e uso e cobertura da terra do MapBiomias (2020).

2.3. MAPEAMENTO DO NÚMERO DA CURVA (CN) PARA O ESTADO DE MINAS GERAIS

Para a composição do mapa contendo os valores iniciais de CN (método tabelado), foi estabelecida a relação entre os tipos de solo e as classes de uso do solo do método *Soil Conservation Service – SCS*, apresentado em Tucci, Barros, & Porto (1995), com os tipos de solo do mapa de solos do estado (SEMAD, 2010) e as classes de uso e cobertura da terra apresentadas pelo IBGE (2018). A Tabela 1 apresenta as relações consideradas:

Tabela 1. Relações estabelecidas na determinação de CN.

	Variável	Relação adotada para cálculo do Número da Curva	
Tipo de solo	Solos	Mapa de Solos de Minas Gerais + tabela do método + considerações de Satori (2004) = enquadramento da pedologia simplificada de MG nos grupos hidrológicos A, B, C ou D;	
Uso do solo	Uso e Cobertura do Solo – Adaptação das classes do IBGE (2018) para as classes de Tucci, Porto e Barros (1995)	<i>Uso do solo – IBGE</i>	<i>Uso do solo - Tabelado</i>
		Área Agrícola	média dos valores: zonas cultivadas com conservação do solo e sem conservação do solo;
		Área Artificial	média dos valores: zonas comerciais e de escritórios, zonas industriais, zonas residenciais e arruamentos e estradas. *Zonas residenciais: média entre todos os tamanhos de lotes, pela variabilidade (MINAS GERAIS, 2021) **Arruamentos e estradas: asfaltadas e com drenagem de águas pluviais, segundo IBGE (2018);
		Área Florestal	Floresta: cobertura boa;
		Área Úmida	Bosques ou zonas com cobertura ruim, por serem áreas com vegetação, porém baixa infiltração devido à saturação, conforme descrição do IBGE (2018);
		Ocupações em Área Campestre ou Área Florestal	Zonas residenciais: média dos valores de % média impermeável de 20 a 38, de acordo com o diagnóstico do Cadastro Ambiental Rural (CAR) (MINAS GERAIS, 2018);
		Pastagem com Manejo	Pastagens ou terrenos em más condições;
		Silvicultura	média dos valores: zonas cultivadas com conservação do solo e sem conservação do solo;
		Vegetação Campestre	Bosques ou zonas com cobertura ruim;
		Vegetação Florestal	Floresta: cobertura boa;

Tendo estas relações estabelecidas, foi possível encontrar os valores iniciais de CN para o estado e mapeá-los, com auxílios de ferramentas do QGIS.

2.4. REFINAMENTO DO NÚMERO DA CURVA (CN)

Para o refinamento dos valores iniciais, foram selecionados dados espaciais da área que influenciam diretamente da capacidade de escoamento, e, conseqüentemente em CN, conforme recomendam Carvalho e

Rodrigues (2021). Estes dados foram selecionados a partir das bases de dados do estado de Minas Gerais, e das relações entre aspectos do meio físico e ambientais e a distribuição das águas precipitadas, conforme Stewart et al. (2012); Woodward et al. (2018); Carvalho e Rodrigues (2021).

A seleção de variáveis buscou incorporar dados que possuem direta e inversamente proporcionais ao CN, dado que seria realizada uma álgebra de mapas e o intervalo do coeficiente deve, ao final, variar de 0 a 100.

Tendo-se o mapa inicial de CN e as variáveis a serem utilizadas no refinamento em formato *shapefile*, foi feita a avaliação de cada uma destas variáveis, verificando se são diretamente ou inversamente proporcionais ao coeficiente (ver detalhe no material suplementar).

Então foi estabelecido um fator de influência de 10% para as variáveis com relação ao CN. Ou seja, à medida que a variável aumenta ou diminui o CN aumenta ou diminui em 10%, de acordo com o conceito da variável e seu potencial em aumentar ou diminuir os índices de escoamento superficial.

A atribuição do fator de influência se deu a partir de álgebra de mapas, com base no mapeamento inicial do CN tabelado para o estado. Este percentual foi atribuído para posterior verificação de representatividade dentro da dinâmica local, e foi definido com base nas etapas de análise exploratória e caracterização da área de estudo.

Ou seja, dado que o coeficiente CN foi desenvolvido pelo SCS de maneira empírica, após análises e avaliações do sistema local (no caso o território dos Estados Unidos), este trabalho realizou atribuições de percentuais de influência de variáveis espaciais do estado de Minas Gerais para avaliar empiricamente o desempenho do refinamento de CN.

Conforme apontam Woodward et al. (2018), utilizar o método de tentativas e validações para a obtenção de valores de CN adaptados é uma das alternativas metodológicas, dada a possibilidade de validação com dados coletados em campo. Isso permite lidar com as limitações do método e encontrar valores mais concisos e representativos, principalmente ao utilizar a estatística para corroborar com os resultados encontrados.

A Tabela 2 mostra as variáveis utilizadas no refinamento e a álgebra realizada com os dados espaciais (considerando a influência de 10%) a partir dos valores iniciais de CN (método tabelado):

Tabela 2. Variáveis e pesos utilizados no refinamento de CN.

Qualidade Ambiental e Exposição do Solo	Muito Baixa: multiplicação por 1,2 Baixa: multiplicação por 1,1 Média: valores mantidos Alta: multiplicação por 0,9 Muito Alta: multiplicação por 0,8
Vulnerabilidade Natural e Intensidade Média das Chuvas	Muito Baixa: multiplicação por 0,8 Baixa: multiplicação por 0,9 Média: valores mantidos Alta: multiplicação por 1,1 Muito Alta: multiplicação por 1,2
Atividades Econômicas e Densidade de Ocupação Econômica	Muito Precário: multiplicação por 0,8 Precário: multiplicação por 0,9 Pouco Favorável: valores mantidos Favorável: multiplicação por 1,1 Muito Favorável: multiplicação por 1,2

Obs.: Todas as camadas vetoriais da Tabela 2 possuem escala 1:1.000.000.

Para auxiliar a álgebra de dados espaciais foi construído um modelo no Dinamica EGO, usando metodologia proposta por Soares-Filho et al. (2009), visando automatizar o processo. Os dados vetoriais (.shp) foram convertidos em formato matricial (.tif) com o auxílio do ArcGIS e inseridos no Dinamica EGO para a construção de um modelo que realizasse a álgebra de mapas para incorporação das variáveis a partir do CN inicial (fluxo metodológico conforme material suplementar).

Após a obtenção do mapa de CN refinado, os resultados foram trabalhados no QGIS para a análise de resultados, possíveis ajustes e layout do mapa final. Os valores refinados foram analisados, e, como o intervalo apresentou valores acima 100 para o CN, foram necessárias ponderações.

Nesse sentido, considerando os trabalhos desenvolvidos por (Carvalho and Rodrigues, 2021; Walega and Salata, 2019 e Woodward et al., 2002) e a própria concepção da metodologia do SCS do coeficiente CN, que varia de 0 a 100, os valores superiores a 100 observados após o refinamento foram enquadrados como sendo o valor máximo do coeficiente 100. Essa opção metodológica foi escolhida em detrimento do reescalonamento dos valores (valor máximo corresponde a 100, etc).

Tendo em vista que CN igual à 100 indica solo saturado e águas precipitadas sendo totalmente escoadas superficialmente, valores superiores a 100 representam também taxa de escoamento máxima, estando na mesma classe do valor 100. Assim, foi possível estimar a porcentagem das áreas em Minas Gerais com esse perfil hidrológico.

2.5. COMPILAÇÃO, ANÁLISE E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

A partir do refinamento dos valores de CN para o estado de Minas Gerais, foi elaborado um mapa final contendo os valores observados. Conforme dispõem Walega e Salata (2019), a utilização de valores de CN eficientemente representativos é de suma importância para estudos e para a eficiência de modelos hidrológicos, os quais possuem ampla aplicação. Portanto, o mapa gerado se trata de uma ferramenta para não só para a gestão hídrica, mas também é um importante critério para definir a homogeneidade e funcionalidade das Unidades de Paisagem em Minas Gerais.

Para analisar o mapa final, foi selecionada uma bacia hidrográfica de conhecimento prévio para avaliação da confiança dos resultados obtidos para CN. Assim, os dados de CN refinados foram confrontados com a caracterização hidrológica da Bacia do Rio Doce realizada previamente.

Ao confrontar os dados do local e os valores obtidos para o coeficiente, foi possível analisar estimativas dos resultados obtidos, conforme corroboram Stewart et al. (2012). Essa comparação foi possível a partir das ferramentas de softwares de geoprocessamento, comparando os resultados obtidos com dados hidrológicos e ambientais, neste caso vulnerabilidade à eventos extremos de inundação e CN observado em área de preservação.

Para validar os resultados, comparou-se os valores de CN refinados aos dados de vulnerabilidade a eventos extremos de inundação, elaborado pela ANA de 2015 para a Bacia do Rio Doce, observando a ocorrência de valores do coeficiente nas vulnerabilidades alta, média e baixa.

Além disso, para o recorte da sub-bacia do Rio Piranga, também explorada na etapa inicial de análise, foi realizada uma análise visual da incidência de valores de CN refinados através de uma área de preservação ambiental, onde já são esperados valores de CN baixos, dada a preservação do local e dinâmica de equilíbrio hidrológico.

Foi possível também validar os resultados obtidos também com a construção de um modelo básico preliminar para uma sub-bacia do Rio Piranga, denominada Santa Rita de Minas, com área inferior a 90 km². O modelo foi construído com dados de entrada básicos no HEC-HMS, objetivando comparar a vazão de pico obtida em duas simulações: com o CN inicial (método tabelado) e com o CN final (pós refinamento), e ao final comparar ambas as vazões simuladas com vazões máximas observadas na estação de monitoramento da ANA do local.

Esta modelagem foi realizada de forma básica para representar uma das validações dos resultados, por isso foi selecionada uma sub-bacia de menor área, com dados de série histórica de precipitação e dados físicos. O HEC-HMS permite a construção de modelos básicos, porém para que os resultados obtidos nestes modelos sejam aplicados efetivamente são necessárias validações (Khoi, 2016). O presente estudo utilizou a ferramenta de modelagem para validar os resultados a partir de comparação, e os resultados do modelo não foram utilizados em outras etapas.

3. Resultados e Discussão

Conforme dispõem Walega & Salata (2019), a utilização de valores de CN eficientemente representativos é de suma importância para estudos e para a eficiência de modelos hidrológicos, os quais possuem ampla aplicação. Portanto, o mapa gerado para o estado de Minas Gerais se trata de uma ferramenta para não só para a gestão hídrica, mas também é um importante critério para definir a homogeneidade e funcionalidade das Unidades de Paisagem em Minas Gerais.

Na Figura 1 está apresentado o mapa contendo os valores iniciais de CN, obtidos a partir do método usual de tabelas, conforme relações estabelecidas na etapa metodológica:

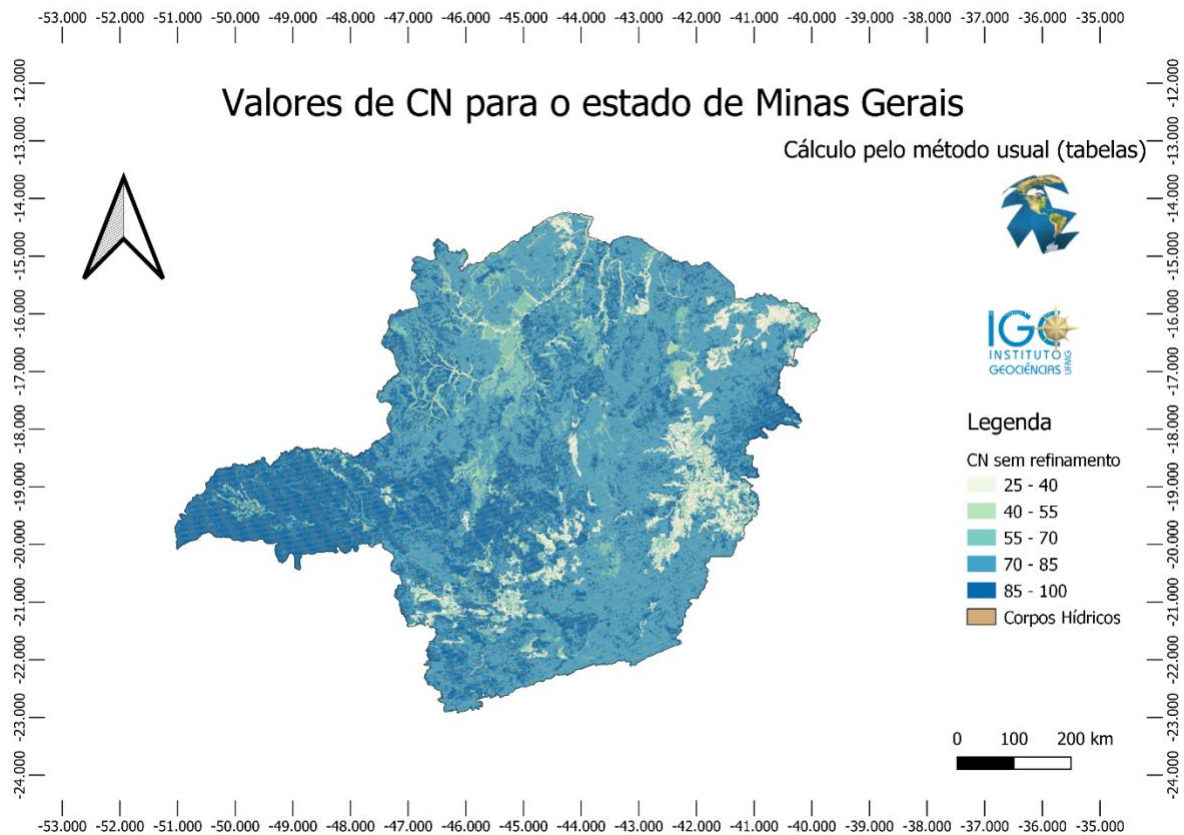


Figura 1. Mapa de CN baseado no método de tabelas para o estado de Minas Gerais.

Os valores baixos de CN podem ser interpretados como proximidade ao equilíbrio natural e desejável entre escoamento e infiltração (Canholi, 2014), enquanto valores elevados estão relacionados à uma elevada taxa de escoamento superficial, geralmente associadas à locais com interferência antrópica no meio.

O refinamento baseado na metodologia descrita previamente, resultou no mapa de CN apresentado na Figura 2, após considerações geralmente necessárias ao manipular espacialmente o CN para sua adaptação, a depender do método utilizado (Valle Junior, Rodrigues, & Oliveira, 2019). Neste caso, a consideração realizada na manipulação dos resultados foi o enquadramento do CN ao intervalo de 0 a 100, conforme descrito na metodologia. Observa-se uma grande variação espacial nos valores de CN. Dada a variabilidade dos parâmetros de entrada e a própria composição das paisagens, espera-se que os coeficientes de CN que representem a realidade sejam variáveis, visto que em um cenário real o uso e cobertura da terra varia espacialmente até mesmo em áreas pequenas, assim como os tipos de solo (Woodward et al., 2018).

O mapa da Figura 2 expressa visualmente a hidrodinâmica local, refletindo a relação entre as taxas de escoamento e infiltração. Portanto, pode ser usada como ferramenta na identificação de focos para intervenção, assim como locais essenciais para a manutenção do equilíbrio hidrológico (Herrera-Sánchez & Navarro-Bermúdez, 2021; Machado, 2002; Oliveira et al., 2016).

Dessa forma, os valores máximos de 100 indicam locais onde há escoamento superficial total das águas precipitadas, prioritários para intervenção devido ao desequilíbrio do ciclo hidrológico ideal. Assim, os valores refinados mostram locais vulneráveis, com valores elevados em regiões a serem consideradas para ações de gestão hídrica e atenuação do volume escoado. Também são indicados e locais onde o CN muito baixo reforça a necessidade de manutenção da preservação para auxiliar o equilíbrio ecossistêmico. Estas áreas são as que mais sofrem com o conflito pelo uso da água, visto que são as que mãos possuem Declaração de Área de Conflito (DAC), pelo IGAM. Ou seja, os valores refinados representam o comportamento do fluxo das águas e permite priorizações e gestão dos recursos (Donald E. Woodward et al., 2018).

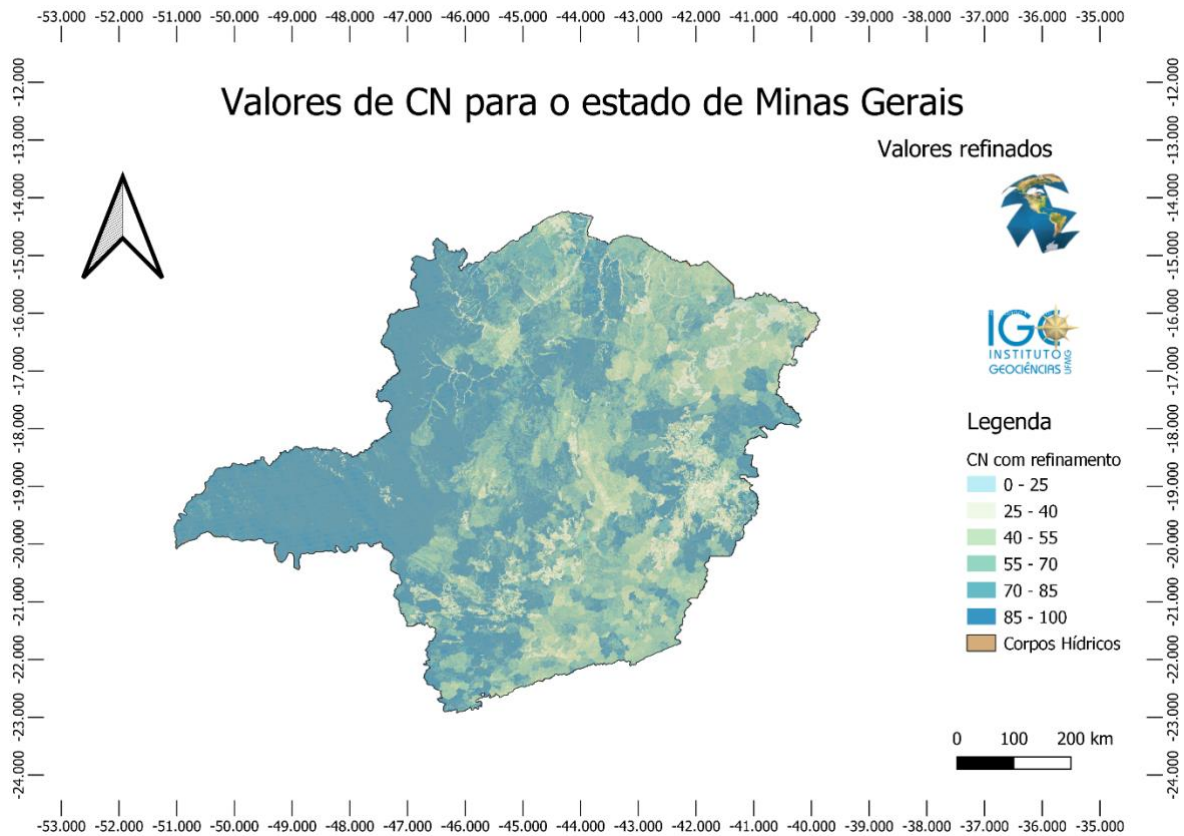


Figura 2. Mapa de CN refinado para o estado de Minas Gerais.

É possível observar a mudanças na distribuição dos valores de CN, sendo valores altos predominantes via método tabelado. Ressalta-se que os corpos hídricos possuem valor de CN igual a 100 (SCS, 1986) (Tabela 3). A antropização e os índices de intervenção, degradação ambiental e a própria ocorrência de eventos extremos hidrológicos possuem o potencial de aumento dos valores de CN, contudo, valores acima de 70 indicam grande desequilíbrio hidrológico (Fernandes, Cunha, & Silva, 2005), o que corrobora com o indicativo do aumento de valores intermediários pós refinamento.

Tabela 3. Dados de CN para o estado de Minas Gerais após o refinamento dos dados.

Intervalos de CN	% da área total do estado de MG	
	CN tabelado	CN refinado
Baixo – 0 a 40	6,46	5,18
Médio – 40 a 70	9,49	30,29
Alto – 70 a 100	84,05	65,34

3.1 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Para a primeira etapa de validação, o mapa contendo a vulnerabilidade à eventos extremos para o estado de Minas Gerais foi sobreposto ao mapa com os valores de CN refinados, visando avaliar a frequência dos valores para cada classe de vulnerabilidade (Tabela 4).

Observa-se que o refinamento possibilitou uma representação alinhada com os dados hidrológicos locais. Cabe salientar que o comportamento dos valores de CN é um bom indicio quanto à susceptibilidade de um local às inundações, e que o valor do coeficiente auxilia na justificativa de tais eventos, e vice-versa (Donald E. Woodward et al., 2018).

Tabela 4. Frequência de valores de CN em intervalos para cada vulnerabilidade à eventos extremos.

CN	Frequência / Vulnerabilidade		
	Alta	Média	Baixa
< 13	1	1	4
13 a 24	2	16	20
25 a 34	4	10	17
35 a 44	7	10	18
45 a 54	2	10	16
55 a 64	5	10	18
65 a 74	7	10	12
75 a 84	9	10	14
85 a 94	13	10	10
95 a 100	102	70	38

O segundo nível de validação foi realizado o recorte para a sub-bacia do Rio Piranga. Na Figura 3 são apresentados os dados de CN refinado para esta sub-bacia.

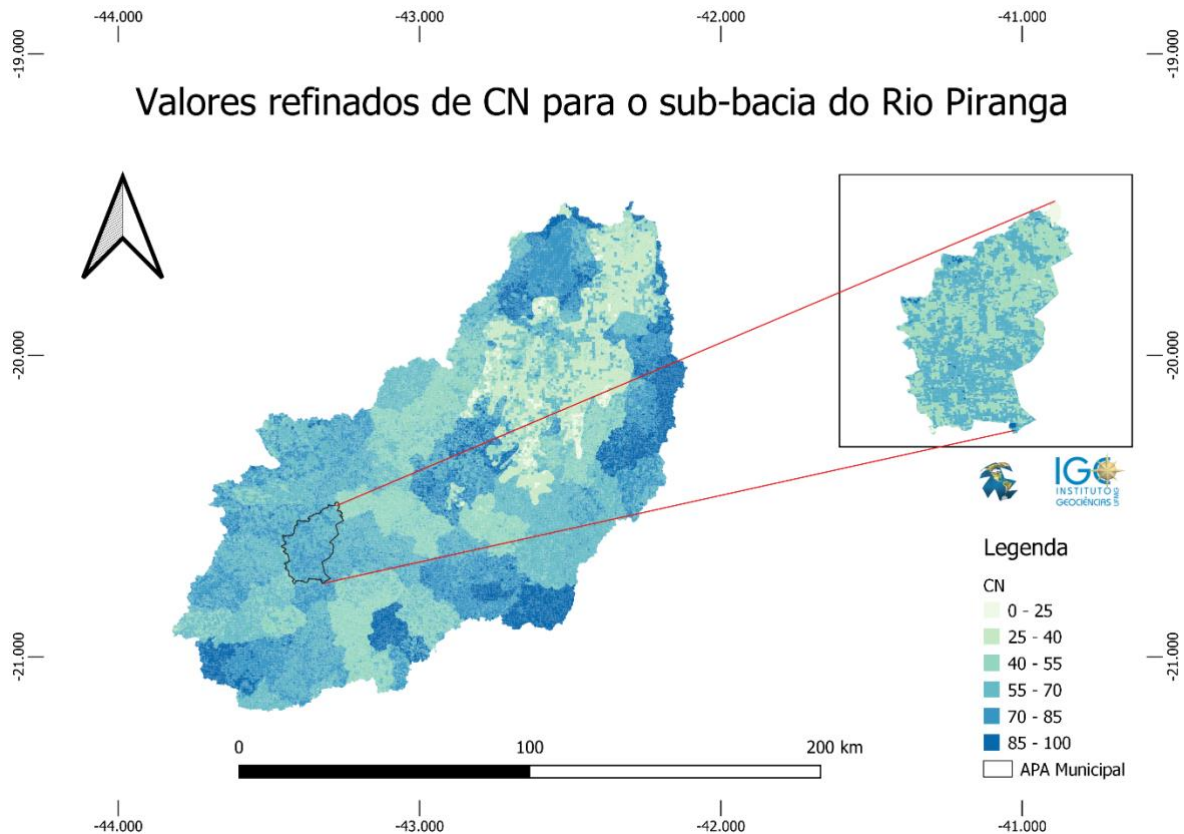


Figura 3. Mapa de CN refinado para a sub-bacia do Rio Piranga.

Conforme observado na Figura 3, os valores refinados apresentam coerência com relação à dinâmica do uso do solo local. Para visualizar esta conclusão, foi feito um recorte para um Área de Preservação Ambiental (APA) municipal dentro da sub-bacia do Rio Piranga, conforme visto na Figura 3.

Os valores de CN da APA municipal apontam maior parte dos valores como baixos, o que é esperado em áreas preservadas. Porém, neste local também são observados CNs de até 84, o que pode ser explicado pelo fato de as regiões de preservação na sub-bacia do Piranga muitas vezes associarem a preservação com atividades e estruturas, como por exemplo para fins lazer, o que modifica diretamente a capacidade de infiltração do solo (Salvador, 2014).

Para a validação da eficiência dos valores refinados de CN no contexto de aplicação destes valores, foi selecionada uma sub-bacia pertencente à bacia do Rio Doce (Figura 4), com área de aproximadamente 90 km², para simulação hidrológica e comparação dos resultados com os valores obtidos da estação de monitoramento da ANA que se encontra nesta sub-bacia.

Foi construído um modelo básico no HEC-HMS tendo como entrada os dados físicos da sub-bacia (Figura 4, Tabela 5) e a série histórica de precipitação (dados diários de dezembro de 2006 a outubro de 2022, obtidos na base de dados da ANA). Esta validação apresentou os resultados observados na Tabela 6.

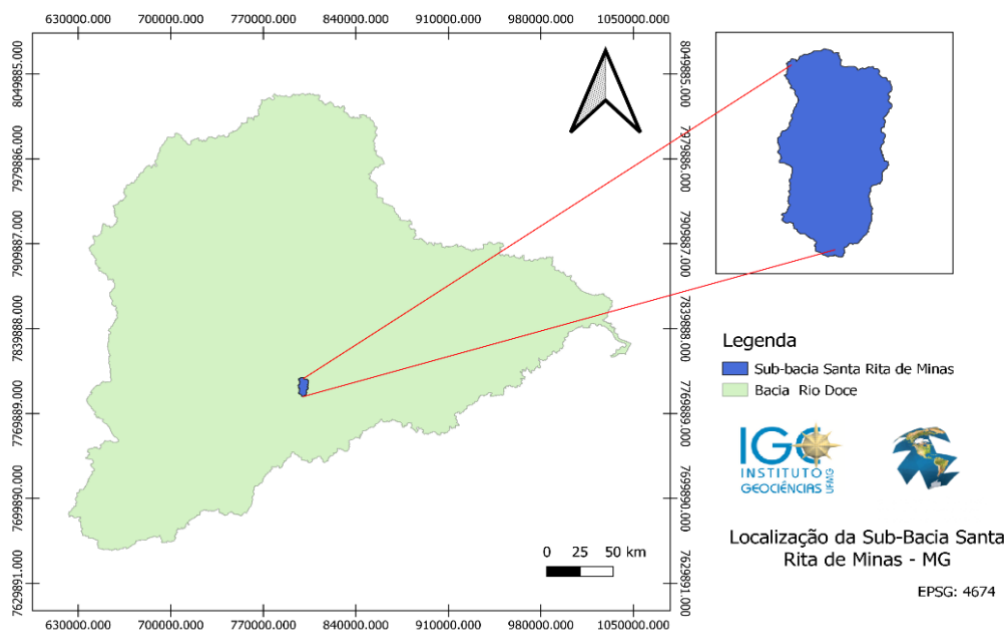


Figura 4. Localização da sub-bacia Santa Rita de Minas.

Tabela 5. Dados físicos da sub-bacia Santa Rita de Minas.

Área (km ²)	Declividade média (%)	Comprimento do rio (m)	CN tabelado	CN refinado
89,05	31%	19.478,96	72,560	35,405

Tabela 6. Comparação entre simulações hidrológicas com CN tabelado e CN refinado para a sub-bacia Santa Rita de Minas.

Vazão de pico – CN tabelado	Vazão de pico – CN refinado	Vazão de pico – Estação de Monitoramento
117,6 m ³ /s	40,0 m ³ /s	28,28 m ³ /s

As simulações indicam que, ao utilizar os valores refinados na simulação, a vazão resultante se aproxima da vazão observada in situ, o que indica que o modelo está mais aderente e representativo a realidade local, no contexto da sub-bacia. O desempenho do CN e seu potencial na construção de modelos concisos são importantes ferramentas para os estudos hidrológicos e estudos da paisagem e ordenamento e planejamento territorial (Calzavara & Fernandez, 2015; Jin et al., 2003).

4. Conclusão

O gerenciamento dos recursos hídricos é uma área de extrema importância dentro da gestão dos recursos naturais e do planejamento, estando diretamente relacionado com o uso e cobertura da terra e suas mudanças, assim como com fatores climáticos e características físicas ambientais.

A utilização de análise espacial juntamente com modelos hidrológicos e simulações se torna uma importante ferramenta neste sentido. Quanto melhor a qualidade dos dados de entrada, mais precisos e eficientes se tornam os modelos e seus dados gerados. Sendo o método do Número da Curva (CN) uma metodologia disseminada para cálculos envolvendo variáveis hidrológicas, e amplamente utilizado como base da modelagem nesta área, trabalhar em suas limitações e em maneiras de aprimorar seu coeficiente base é uma maneira de melhorar o desempenho dos modelos e trazer as representações para próximo das realidades locais.

Ao refinar os valores de CN para o estado de Minas Gerais, incorporando variáveis que representam características do local que influenciam diretamente nos processos de escoamento e conseqüentemente no valor do coeficiente, obteve-se um mapa com valores de CN que se espera que sejam mais alinhados à realidade Mineira, e que também permitem uma visualização acerca do comportamento das variáveis envolvidas no balanço hidrológico no território.

Adaptar e refinar o valor de CN tem sido o foco de outros estudos já realizados, principalmente por se tratar de um coeficiente amplamente utilizado em modelos. Os valores deste coeficiente, para além da aplicação em modelos, permite a interpretação das condições locais de escoamento e infiltração, avaliando o equilíbrio e a vulnerabilidade das áreas estudadas.

Confrontando-se os dados obtidos no refinamento com características locais pertinentes à hidrologia e modelagem já executada, foi possível verificar que os valores encontrados são capazes de estimar a realidade, podendo ser utilizados para estudos e simulações, com grande potencial para a obtenção de resultados mais precisos.

Dessa forma, o mapa gerado é um instrumento dentro da hidrologia, e supre uma limitação do método tradicional para o cálculo de CN, que utiliza tabelas e dados empíricos para calcular o coeficiente sem considerar as particularidades locais. Por fim, recomenda-se a utilização dos valores espaciais gerados para a construção de modelos concisos no âmbito da hidrologia, que possam ser confrontados com dados de referência para validação e então serem utilizados para simulações e construção de cenários futuros.

Os resultados do mapa refinado de CN podem ser usados como uma camada para representar a componente hidrológica e subsidiar o desenvolvimento de unidades de paisagem em Minas Gerais. Esta informação pode ser usada para subsidiar a formulação de políticas públicas e a gestão das diferentes unidades de paisagem em Minas Gerais.

O mapa de CN refinado depois de aprimoramentos e validações em outras bacias, para além do Rio Doce poderá permitir, por um lado diferenciar dentro das UPs já desenvolvidas pela EMATER (2014) e poderá subsidiar uma nova forma de delimitação das UPs incorporando os valores de CN refinado.

Este trabalho, pode contribuir para atingir os ODS 6 (Garantir disponibilidade e manejo sustentável da água e saneamento para todos), ODS 11 (Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis) e ODS 15 (Proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda de biodiversidade).

5. Referências

ANA (2015). Vulnerabilidade a Inundações na Bacia do Rio Doce. Recuperado 17 de maio de 2023, de Catálogo de Metadados da ANA website: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/1ae69fdf-7353-4d35-8ec6-2bdb9f7c4dd7>

Azizah, C., Pawitan, H., Dasanto, B. D., Ridwansyah, I., & Taufik, M. (2022). Risk assessment of flash flood potential in the humid tropics Indonesia: A case study in Tamiang River basin. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 13(1), 57–73. <https://doi.org/10.1504/IJHST.2022.119236>

Beroutchachvili, N., & Bertrand, G. (1978). Le géosystème ou «système territorial naturel». *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, 49(2), 167–180. <https://doi.org/10.3406/rgps.1978.3548>

Britto, M. C. de, & Ferreira, C. de C. M. (2011). PAISAGEM E AS DIFERENTES ABORDAGENS GEOGRÁFICAS. *Revista de Geografia - PPGEO - UFJF*, 1(2). Recuperado de <https://periodicos.ufjf.br/index.php/geografia/article/view/17890>

Bussi, G., Ortiz, E., Francés, F., Pujol, L., Guna, V., Bellver, V., ... Sl, H. (2010). *Modelación hidrúlica y análisis del riesgo de inundación según las líneas guía de la Directiva Marco del Agua. El caso de la Marina Alta y la Marina Baja (Alicante)*.

Calzavara, S. F., & Fernandez, O. V. Q. (2015). Uso e ocupação do solo e Número de Curva (CN) na bacia hidrográfica do Córrego Matilde Cuê, Marechal Cândido Rondon (PR). *Geingá: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia (PGE/UEM)*, 7(1), 185–209. <https://doi.org/10.4025/geoinga.v7i1.49290>

Canholi, A. P. (2014). *Drenagem urbana e controle de enchentes* (2a ed. ampl. e atualiz.). São Paulo: Oficina de Textos.

Cao, H., Vervoort, R. W., & Dabney, S. M. (2011). Variation in curve numbers derived from plot runoff data for New South Wales (Australia). *Hydrological Processes*, 25(24), 3774-3789. <https://doi.org/10.1002/hyp.8102>

CAR. (2018). Cadastro Ambiental Rural. Recuperado 3 de maio de 2023, de Portal da Transparência do Meio Ambiente website: <https://www.car.gov.br/#/>

Carvalho, F., & Rodrigues, S. C. (2021). Método Curve Number – pesquisas e discussões dos parâmetros valor CN e abstração inicial. *Geografia Ensino & Pesquisa*, e31. <https://doi.org/10.5902/2236499447861>

Carvalho Ribeiro, S. M., Boscolo, D., Ciochetti, G., Firmino, A., & Guiomar, N. (2021). *Ecologia da Paisagem no Contexto Luso-Brasileiro—Volume 1*.

Cervantes-Borja, J., & Alfaro-Sánchez, G. (1998). La ecología del paisaje en el contexto Del desarrollo sustentable. Em *La ecología del paisaje como base para el desarrollo sustentable em América Latina*. Salinas Cháves, Eduardo AND Middleton, John.

Cestaro, L. A., Araújo, P. de, Medeiros, C. de, Cisneiros, R., & Araújo, L. P. (2007). Proposta de um sistema de unidades geoambientais para o Rio Grande do Norte. *Simpósio Brasileiro de geografia física aplicada*, 12, 267.

Christofoletti, A. (1999). *Modelagem de Sistemas Ambientais* (1º ed). Blucher.

Coelho, A. L. N. (2007). *Alterações Hidrogeomorfológicas no Médio-Baixo Rio Doce/ES* (Doutorado em Geografia). Universidade Federal Fluminense.

Collischonn, W., & Tucci, C. (2001). Simulação Hidrológica de grandes Bacias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 6(1), 95-118. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v6n1.p95-118>

Cupolillo, F. (2008). *Diagnóstico hidroclimatológico da Bacia do Rio Doce* (Universidade Federal de Minas Gerais). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Recuperado de <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/MPBB-7F8NTB>

Dalbem, R. P., Moura, A. R. de, Jorge, F. V., Morokawa, M., & Valaski, S. (2005). Delimitação de Unidades de Paisagem: conceito e método aplicados ao município de Paranaguá/PR/ Brasil. *Anais do XI Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*. USP.

Espindola, H. S., Nodari, E. S., & Santos, M. A. dos. (2019). Rio Doce: Riscos e incertezas a partir do desastre de Mariana (MG). *Revista Brasileira de História*, 39, 141–162. <https://doi.org/10.1590/1806-93472019v39n81-07>

Feitosa, A., Fechine, J. A. L., Ferreira, C. W. S., & Araújo, M. do S. B. de. (2010). Modelagem dinâmica de escoamento superficial influenciando a susceptibilidade à erosão dos solos num município do Semi-árido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 11(2). <https://doi.org/10.20502/rbg.v11i2.154>

Felippe, M. F., Costa, A., Franco, R., & Matos, R. (2016). *Relatório da Expedição ao Rio Doce*. Belo Horizonte / Juiz de Fora: UFMG / UFJF.

Fernandes, E. A., Cunha, N. R. da S., & Silva, R. G. da. (2005). Degradação ambiental no estado de Minas Gerais. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 43, 179–198. <https://doi.org/10.1590/S0103-20032005000100010>

Gao, Y., Zhu, B., Miao, C. Y., & Zhang, J. Z. (2006). Application of SCS Model to Estimate the Volume of Rainfall Runoff in Sloping Field of Purple Soil. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 22(11), 396.

Herrera-Sánchez, M. D., & Navarro-Bermúdez, O. D. (2021). *Evaluación de riesgo de desastre por inundación usando herramientas SIG y HEC HMS y RAS para el Distrito de Conservación de Suelos Kirpas, Pinilla La Cuerera de la ciudad de Villavicencio – Meta* (Universidade Católica da Colômbia). Universidade Católica da Colômbia, Bogotá. Recuperado de <https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/fe30c674-859c-44c7-af97-34d059885d16>

IBGE. (2018). *Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra* [Data set].

IGAM. (2020). Unidades Estratégicas de Gestão. Recuperado 3 de maio de 2023, de <https://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/unidades-de-planejamento>

Jacobs, J. H., & Srinivasan, R. (2005). Effects of curve number modification on runoff estimation using WSR-88D rainfall data in Texas watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation*, 60(5), 274–273.

Jin, H., Sun, X., & Li, Y. (2003). Application of SCS Model in Lanhe Watersheds. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 34(6), 735–752.

Khoi, D. N. (2016). Comparison of the Hec-Hms and Swat Hydrological Models in Simulating the Streamflow. *Journal of Science and Technology*, 53, 189–195.

- Machado, R. E. (2002). *Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento*. (Doutorado em Irrigação e Drenagem, Universidade de São Paulo). Universidade de São Paulo, Piracicaba. <https://doi.org/10.11606/T.11.2002.tde-10072002-161200>
- McGarigal, K., & Marks, B. J. (1995). *FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure*. (Nº PNW-GTR-351; p. PNW-GTR-351). Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. <https://doi.org/10.2737/PNW-GTR-351>
- Milanez, B., & Losekann, C. (2016). *Desastre no Vale do Rio Doce: Antecedentes, impactos e ações sobre a destruição* (1º ed). Rio de Janeiro: Folio Digita.
- MMA. (2017). Gestão Integrada da Paisagem. Recuperado 3 de maio de 2023, de MMA. Ministério do Meio Ambiente website: <http://antigo.mma.gov.br/mmanoforum/item/15468-gest%C3%A3o-integrada-da-paisagem.html>
- Oliveira, P. T. S., Nearing, M. A., Hawkins, R. H., Stone, J. J., Rodrigues, D. B. B., Panachuki, E., & Wendland, E. (2016). Curve number estimation from Brazilian Cerrado rainfall and runoff data. *Journal of Soil and Water Conservation*, 71(5), 420–429. <https://doi.org/10.2489/jswc.71.5.420>
- ONU. (2015). Objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS): Agenda para 2030. Recuperado 3 de maio de 2023, de ONU website: <https://brasil.un.org/pt-br>
- ONU. (2016). *Relatório da missão ao Brasil da Relatora Especial sobre os direitos dos povos indígenas*. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS.
- Salvador, M. D. M. (2014). *Identificação e avaliação de eventos extremos na bacia hidrográfica do Rio Piranga* (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa MG.
- Sartori, A. (2004). *Avaliação da Classificação Hidrológica do Solo para a Determinação do Excesso de Chuva do Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos* (Dissertação). Universidade Estadual de Campinas, Campinas SP.
- SCS. (1986). *Urban hydrology for small watersheds*. Department of Agriculture, Soil Conservation Service (SCS).
- Silva, M. A. da, Silva, M. L. N., Curi, N., Avanzi, J. C., & Leite, F. P. (2011). Sistemas de Manejo em plantios florestais de eucalipto e perdas de solo e água na região do Vale do Rio Doce, MG. *Ciência Florestal*, 21, 765-776. <https://doi.org/10.5902/198050984520>
- Soares, B. S., Rodrigues, H. O., & Costa, W. L. (2009). *Modeling Environmental Dynamics with Dinamica EGO*. 122.
- Stewart, D., Canfield, E., & Hawkins, R. (2012). Curve Number Determination Methods and Uncertainty in Hydrologic Soil Groups from Semiarid Watershed Data. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17, 1180-1187.
- Tucci, C. E. M. (1997). Plano diretor de drenagem urbana: Princípios e concepção. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 2, 5-12.
- Tucci, C. E. M., Barros, M. T. L. D., & Porto, R. L. L. (1995). *Drenagem Urbana* (1º ed). Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Valle Junior, L. C. G. do, Rodrigues, D. B. B., & Oliveira, P. T. S. de. (2019). Initial abstraction ratio and Curve Number estimation using rainfall and runoff data from a tropical watershed. *RBRH*, 24, e5. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920170199>
- Walega, A., & Salata, T. (2019). Influence of land cover data sources on estimation of direct runoff according to SCS-CN and modified SME methods. *Catena*, 172, 232-242. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.032>
- Woodward, D.E. (2002). Curve number method: Origins, applications and limitations. *US Geological Survey Advisory Committee on Water Information*. Apresentado em Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference.
- Woodward, Donald E., Hawkins, R. H., Hjelmfelt JR., A. T., Mullem, J. A. V., & Quan, D. (2018). *Curve number method: Origins, applications and limitations*. Apresentado em Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Las Vegas. Las Vegas. Recuperado de https://acwi.gov/hydrology/mtsconfvkshops/conf_proceedings/second_fihmc_nevada.pdf
- Zhang, X. Y., Meng, F., & Ding, N. (2003). Application of SCS model to estimating the quantity of runoff of small watershed in semi-arid or arid region. *Research of Soil and Water Conservation*, 10, 172-174.