

UM FRAMEWORK METODOLÓGICO PARA DEFINIÇÃO DO CURVE NUMBER (SCS-CN) VIA GOOGLE EARTH ENGINE: COMPATIBILIZAÇÃO MULTIESCALAR DE DADOS GEOESPACIAIS

Thiago Vieira da Costa¹
Venerando Eustáquio Amaro²

RESUMO – A modelagem hidrológica chuva–vazão em bacias não monitoradas depende fortemente da inferência indireta de parâmetros fisiográficos, sendo o método Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) amplamente utilizado nesse contexto. Apesar de sua ampla difusão, a aplicação contemporânea do método apresenta limitações metodológicas relevantes associadas à definição do parâmetro Curve Number (CN), sobretudo quando se utilizam bases de dados geoespaciais multiescalares derivadas de sensoriamento remoto. A adoção direta das tabelas do TR-55, aliada à reamostragem ingênua de produtos globais, pode introduzir pseudo-precisão espacial e inconsistências físicas na estimativa do escoamento superficial. Este estudo propõe um framework metodológico explícito para a definição do CN em ambiente Google Earth Engine, integrando dados do MapBiomas, SoilGrids e BR-DWGD por meio de critérios objetivos de harmonização de escala. O framework estrutura a parametrização como o elemento central do problema hidrológico, mitigando efeitos do Problema da Unidade de Área Modificável (MAUP) e ampliando a coerência física da modelagem em bacias não monitoradas. A aplicação na bacia do rio Jundiaí, no município de Macaíba/RN, evidencia vantagens metodológicas em relação a produtos globais estáticos, como o GCN250, reforçando a necessidade de abordagens estruturadas para a definição do CN em regiões semiáridas urbanas.

Palavras-Chave: SCS-CN; Google Earth Engine; Semiárido Brasileiro.

ABSTRACT – Hydrological rainfall–runoff modeling in ungauged basins relies heavily on the indirect inference of physiographic parameters, with the Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) method being widely applied in this context. Despite its extensive use, contemporary applications of the method present relevant methodological limitations associated with the definition of the Curve Number (CN), particularly when multiscale geospatial datasets derived from remote sensing are employed. The direct adoption of TR-55 tables combined with naïve resampling of global products may introduce pseudo-spatial precision and physical inconsistencies in runoff estimation. This study proposes an explicit methodological framework for CN definition in the Google Earth Engine environment, integrating MapBiomas, SoilGrids and BR-DWGD datasets through objective scale-harmonization criteria. The framework structures parameterization as the central element of the hydrological problem, mitigating the effects of the Modifiable Areal Unit Problem (MAUP) and enhancing the physical coherence of modeling in ungauged basins. Application to the Jundiaí River basin, in Macaíba (RN), demonstrates methodological advantages over static global products such as GCN250, reinforcing the need for structured approaches to CN definition in semi-arid urban regions.

Key-words: SCS-CN; Google Earth Engine; Brazilian semi-arid.

¹ Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental PPCIVAM/UFRN, Engenheiro Civil e de Produção, Especialista em Drenagem Urbana, Infraestrutura Urbana, Planejamento Urbano e Em Gerenciamento, Fiscalização e Execução de Obras de Esgotamento Sanitário e Abastecimento de Água. E-mail: thiago_vieira@outlook.com

² Doutor Professor do Departamento e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental e Pós-graduação em Geografia, ambos da UFRN, Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – INCT Klimapolis – UFRN, Natal-RN. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7357-2200> Email: venerandoamaro@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

A estimativa do escoamento superficial é o pilar da hidrologia aplicada, essencial ao dimensionamento de infraestruturas de drenagem e mitigação de riscos de inundação. Em bacias não monitoradas, cenário predominante no Nordeste Brasileiro, a modelagem depende da inferência indireta de parâmetros fisiográficos, o que sustenta a onipresença do método Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) devido à sua simplicidade operacional.

Entretanto, as tabelas de referência consolidadas no manual TR-55 baseiam-se em condições edafoclimáticas de climas temperados e bacias rurais estadunidenses, cujos pressupostos de homogeneidade espacial e estabilidade temporal raramente se verificam em ambientes tropicais e semiáridos. No semiárido brasileiro, solos rasos, heterogêneos e a dinâmica antrópica acelerada tornam a definição do *Curve Number* (CN) a principal fonte de incerteza estrutural, superando muitas vezes as limitações da própria formulação matemática do método.

Embora o avanço do sensoriamento remoto e plataformas como o Google Earth Engine (GEE) tenham democratizado o acesso a dados de alta resolução — como o MapBiomas (30m), SoilGrids (250m) e BR-DWGD (10km) — a simples integração dessas bases não assegura consistência hidrológica. A literatura aponta um erro sistemático recorrente: a reamostragem ingênua de todos os dados para a maior resolução disponível. Essa prática ignora o suporte físico das variáveis e introduz pseudo-precisão, gerando artefatos espaciais conhecidos como o Problema da Unidade de Área Modificável (MAUP).

Este desafio insere-se no contexto da iniciativa Predictions in Ungauged Basins (PUB), que preconiza que a qualidade das previsões em bacias sem monitoramento depende fundamentalmente da coerência física dos parâmetros inferidos. Produtos globais existentes, como o GCN250, falham em aplicações urbanas regionais por operarem em resoluções grosseiras, assumirem condições estáticas de uso do solo e negligenciarem a discussão sobre compatibilização multiescalar.

Diante da lacuna de procedimentos que operacionalizem criticamente o SCS-CN com dados geoespaciais modernos, este trabalho propõe um framework metodológico no GEE para a derivação do CN em alta resolução (30m). O foco reside na integração do MapBiomas, SoilGrids e BR-DWGD por meio de critérios explícitos de harmonização, visando mitigar os efeitos do MAUP e elevar a robustez da modelagem hidrológica no semiárido brasileiro.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Conjuntos de dados utilizados

A seleção das bases fundamentou-se em resolução espacial, atualização temporal e disponibilidade no Google Earth Engine. O Copernicus DEM (GLO-30) foi adotado como referência topográfica, definindo a grade de 30m. O MapBiomias (Coleção 10) forneceu o componente categórico de uso do solo, com séries anuais desde 1985. Propriedades físicas contínuas (ex: teores de areia e argila) foram obtidas via SoilGrids (250m). A precipitação diária provém do BR-DWGD (10km), conjunto gradeado para o Brasil calibrado por estações de superfície.

2.1.1 Detalhamento funcional dos dados de entrada

Para a execução do framework, o papel de cada conjunto de dados é estritamente definido. O Copernicus DEM estabelece a grade de referência de 30m, fundamentando a delimitação das sub-bacias e da rede de drenagem que definem as unidades de resposta hidrológica. O MapBiomias fornece o mapeamento categórico de uso e cobertura do solo (30m), integrado diretamente à matriz de decisão do SCS-CN. O SoilGrids disponibiliza as variáveis contínuas (teores de argila, areia e matéria orgânica) em profundidades padronizadas.

Embora a derivação estrutural do Curve Number dependa essencialmente da interação entre o solo e a cobertura da terra, a integração do BR-DWGD ao framework revela-se estratégica por viabilizar a definição dinâmica da Condição de Umidade Antecedente (AMC), permitindo o ajuste preciso do parâmetro à variabilidade climática. Adicionalmente, o uso dessa base consolida a categoria de "dados agregados" dentro da metodologia, o que comprova a robustez do sistema em harmonizar escalas espaciais díspares sem incorrer em distorções ou erros de interpolação física.

2.2 Princípios de harmonização de escala

A aplicação do SCS-CN com dados modernos frequentemente incorre em reamostragem ingênua de todos os conjuntos para a maior resolução disponível, prática que ignora o suporte físico das variáveis, introduz pseudo-precisão e gera artefatos espaciais vinculados ao Problema da Unidade de Área Modificável (MAUP). O framework proposto fundamenta-se na harmonização que respeita a natureza de cada variável, classificando os dados em três categorias críticas. Para dados categóricos, como o uso do solo, mantém-se a resolução nativa do MapBiomias para evitar generalizações indevidas. No caso de variáveis contínuas de solo do SoilGrids, a reamostragem bilinear apresenta vantagens sobre o vizinho mais próximo ao considerar valores adjacentes e produzir transições suaves coerentes com a natureza gradual das propriedades texturais, preservando a estabilidade estatística e reduzindo o risco de extremos artificiais. Para dados agregados de precipitação do BR-DWGD, evita-se a interpolação para não criar

gradientes fisicamente irreais, adotando-se a agregação zonal por sub-bacia ou a reamostragem por vizinho mais próximo, preservando assim a uniformidade original dentro de cada célula

2.3 Framework metodológico para definição do Curve Number em ambiente Google Earth Engine

A precisão do método SCS-CN é intrinsecamente dependente da correta determinação dos Grupos Hidrológicos do Solo (HSG), que classificam os solos de acordo com seu potencial de geração de escoamento superficial. Em bacias não monitoradas (PUB), a classificação qualitativa baseada apenas em descrições textuais pode induzir a erros de interpretação, especialmente em zonas de transição climática onde a resposta hidrológica é sensível a variações mínimas na textura do solo. Para mitigar o risco de equifinalidade e reduzir as incertezas associadas ao suporte espacial do SoilGrids, este framework adota os critérios quantitativos de Ross et al. (2018), utilizando as frações de areia e argila como preditores da condutividade hidráulica saturada (Ksat). Diferentemente da reamostragem ingênua, a integração desses critérios sobre dados reamostrados por interpolação bilinear garante que a classificação reflita a heterogeneidade espacial do terreno em resolução de 30m, alinhando a pedologia à topografia derivada do Copernicus DEM. Essa abordagem confere ao framework uma robustez física superior ao GCN250, uma vez que o parâmetro de maior sensibilidade do método deriva de uma base dinâmica e geograficamente consistente.

A definição dos grupos segue limiares baseados na influência da argila sobre a porosidade e a capacidade de infiltração:

- **Grupo A (Alta Infiltração):** solos com teor de areia superior a 85% e argila inferior a 10%.
- **Grupo B (Infiltração Moderada):** solos com menos de 20% de argila, incluindo solos francos e siltosos.
- **Grupo C (Infiltração Lenta):** solos com teores de argila entre 20% e 35%.
- **Grupo D (Muito Lenta):** solos com teor de argila superior a 35% ou solos muito rasos sobre camadas quase impermeáveis, condições comuns no semiárido brasileiro e associadas a elevado potencial de escoamento superficial.

O fluxo operacional organiza-se em cinco etapas focadas na reprodutibilidade e no rigor metodológico. Primeiramente, estabelece-se a grade de referência de 30m via Copernicus DEM, garantindo a coerência geométrica entre a topografia e o uso do solo. Segue-se a classificação funcional dos insumos em categorias (categóricos, contínuos e agregados), orientando as decisões de integração e reduzindo arbitrariedades na aplicação do método.

Na terceira fase, a harmonização multiescalar aplica downscaling por interpolação bilinear a variáveis contínuas e agregação zonal à precipitação, preservando a resolução original de dados categóricos para evitar gradientes fisicamente irreais. A derivação do Curve Number em alta resolução (30m) ocorre pelo cruzamento dos Grupos Hidrológicos do Solo com o uso da terra, utilizando as tabelas do TR-55 como base conceitual operacionalizada criticamente. Finalmente, a validação conceitual confronta os resultados com o produto global GCN250 para identificar inconsistências estruturais e orientar a aplicação hidrológica. Este procedimento alinha-se à iniciativa PUB, adaptando parâmetros clássicos à realidade de geodados modernos.

O fluxo lógico do framework metodológico é apresentado de forma sintética na Figura 1.

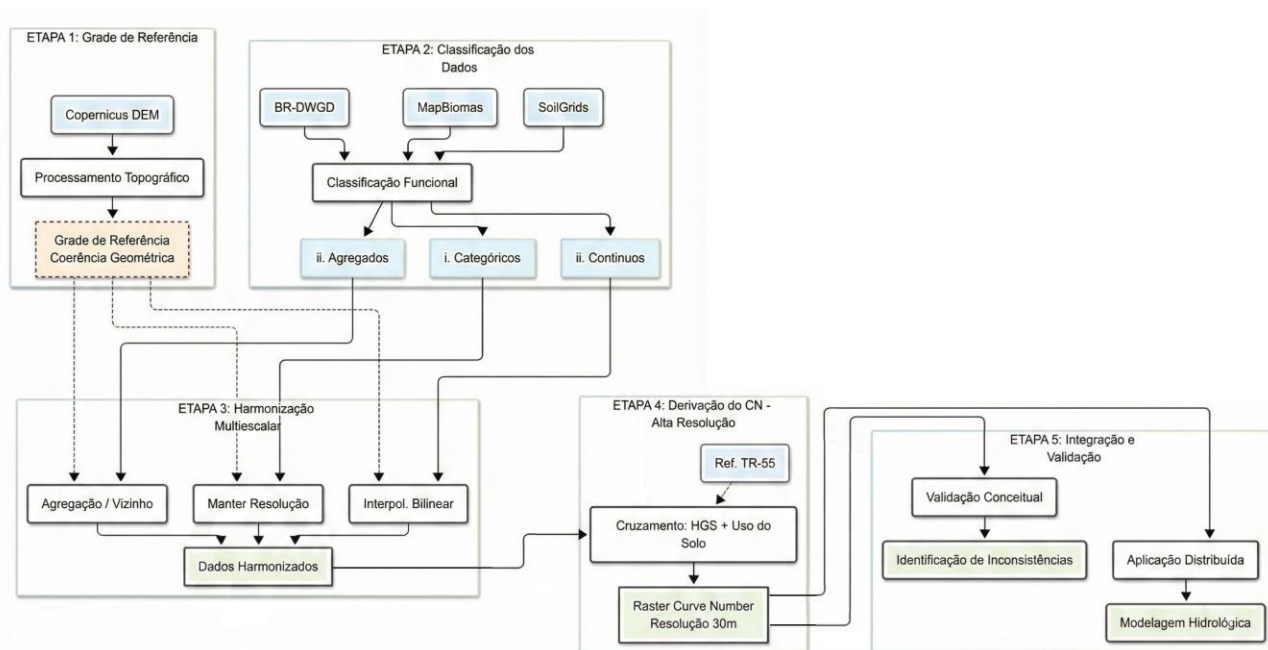


Figura 1 - Fluxograma do framework metodológico: Etapas 1 a 5, entradas, decisões de harmonização e saídas.

2.4 Processamento no Google Earth Engine

Todo o pré-processamento dos dados foi realizado em ambiente Google Earth Engine, incluindo aquisição das bases, reclassificação do MapBiomias (O uso e cobertura do solo utilizados e apresentados na Figura 2), reamostragem das camadas do SoilGrids (Um exemplo da reamostragem bilinear das propriedades do solo é ilustrado na Figura 3, as implicações do suporte espacial da precipitação são evidenciadas na Figura 4, geração do raster final de Curve Number e exportação dos produtos para uso em modelos hidrológicos.

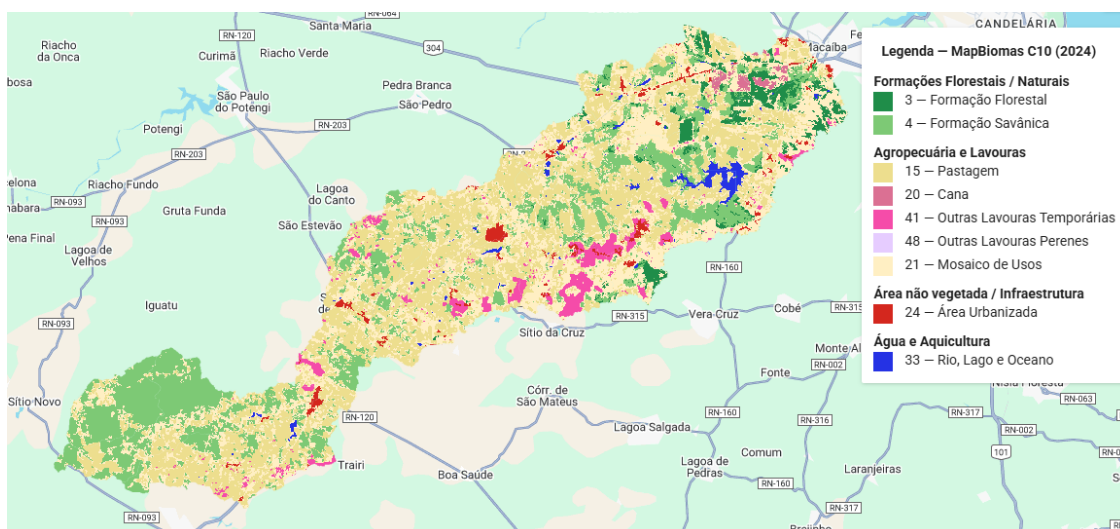


Figura 2 - Mapa de uso e cobertura do solo (MapBiomas, 30m) para o ano de 2024.

--- AREIA (Nativo vs Bilinear) ---

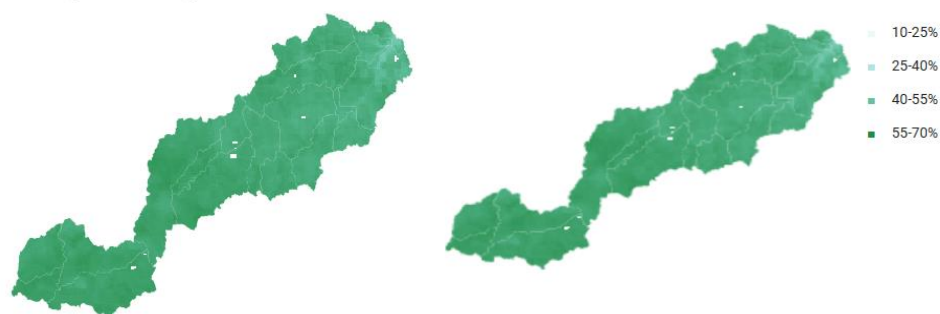


Figura 3 - Exemplo de propriedade do solo do SoilGrids reamostrada por bilinear para 30m (% areia) e sua transição espacial.

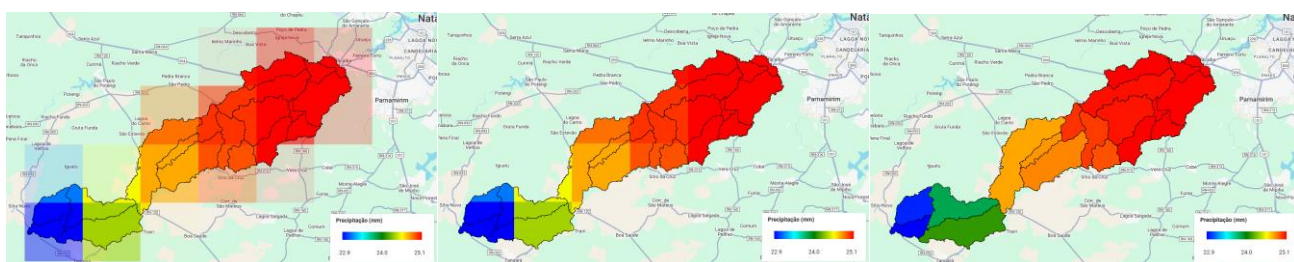


Figura 4 - Grade de precipitação do BR-DWGD para o dia 02/01/2024 (i) Resolução Nativa de 11km (ii) Reamostragem vizinho mais próximo 30m e (iii) Agregação Zonal média ponderada sobreposta à bacia de estudo, evidenciando a disparidade de suporte espacial.

3. RESULTADOS

3.1 Comparação entre o Curve Number derivado pelo framework e o produto GCN250

As diferenças estruturais entre os produtos são evidenciadas tanto na classificação dos grupos hidrológicos quanto nos mapas de Curve Number derivados pelo framework e pelo produto GCN250 (Figura 6).

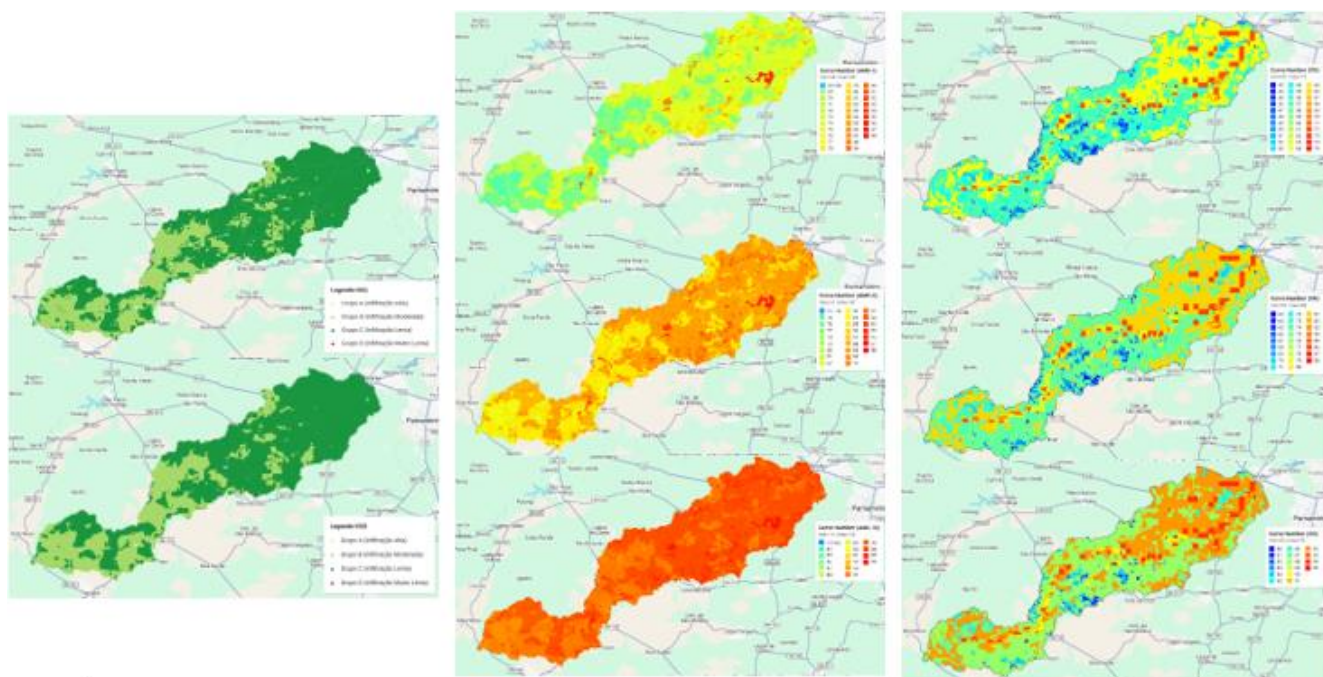


Figura 6 - Grupos Hidrológicos do Solo: (a) HSG original do SoilGrids (250m) e (b) HSG após harmonização por interpolação bilinear (30m) (i). Mapas de Curve Number derivados pelo framework proposto para as condições AMC I, AMC II e AMC III (ii). Mapas de Curve Number derivados do produto GCN250 para as condições AMC I, AMC II e AMC III (iii).

A comparação entre o framework proposto e o produto global GCN250 revelou discrepâncias sistemáticas e coerentes sob as condições AMC I, II e III. Em condição seca (AMC I), os valores do framework foram consistentemente superiores (+1,5 a +5,7 unidades), refletindo maior sensibilidade à heterogeneidade pedológica local proporcionada pela classificação refinada do HSG via SoilGrids harmonizado em 30m.

Sob umidade média (AMC II), as diferenças reduziram para a faixa de +1,5 a +3,5 unidades, acompanhando o aumento relativo da influência do uso e cobertura do solo na geração do escoamento. Ainda assim, o framework demonstrou maior capacidade de discriminar sub-bacias com respostas hidrológicas distintas, especialmente em áreas urbanas e solos francos ou siltosos.

Na condição úmida (AMC III), observou-se forte convergência, com desvios inferiores a $\pm 0,5$ unidades na maioria das sub-bacias. Esse resultado, validado pela análise estatística, indica que a saturação próxima do solo minimiza o controle pedológico sobre o processo de escoamento, levando à convergência natural dos valores de CN independentemente do método de parametrização adotado.

3.2 Implicações hidrológicas dos resultados

A convergência progressiva dos valores de CN entre as condições AMC é evidenciada nos gráficos comparativos Gráfico 1 (Figura 7).

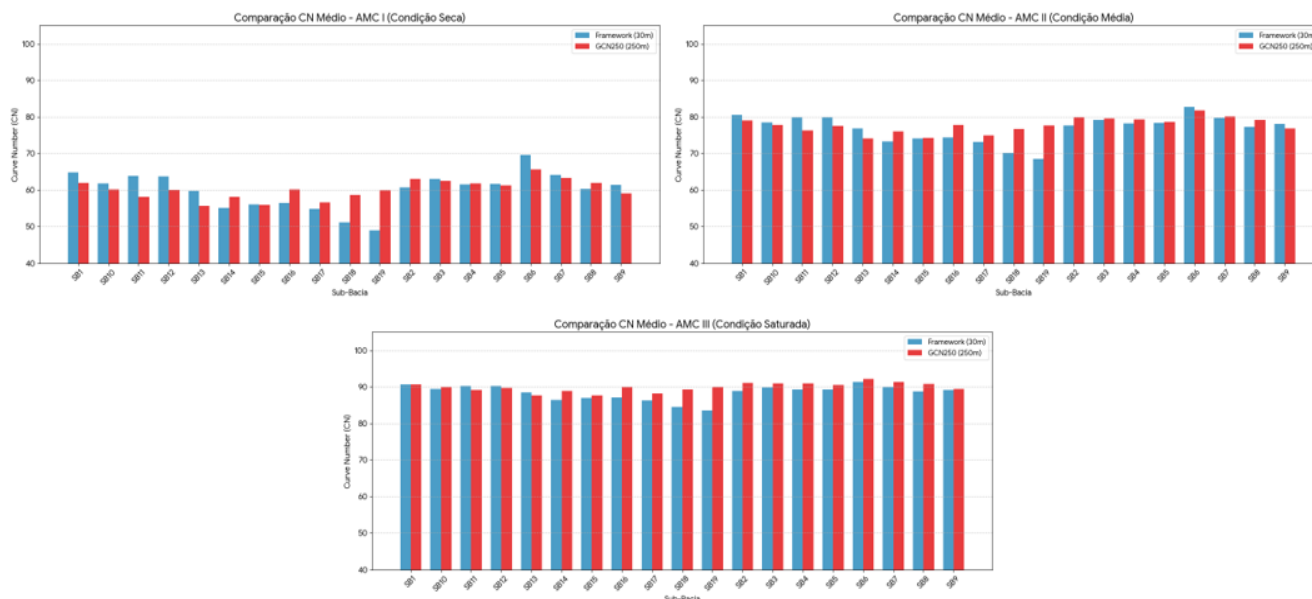


Figura 9 - Comparação AMC I, AMC II e AMC III (GCN250 vs CN 30m)

O padrão observado confirma a coerência física do framework proposto. As maiores diferenças em condição seca e sua progressiva redução em direção à condição úmida estão em plena concordância com os fundamentos do método SCS-CN, segundo os quais a influência das propriedades do solo é maximizada em solos secos e minimizada sob condições de saturação.

Diferentemente do GCN250, que opera com resolução espacial fixa de 250m e lógica global de classificação, o framework demonstrou maior capacidade de representar a variabilidade espacial do potencial de infiltração em escala de sub-bacia. Essa característica é particularmente relevante em ambientes urbanos e de transição climática, como o município de Macaíba/RN, onde pequenas variações na textura do solo podem resultar em mudanças significativas na resposta hidrológica.

Além disso, a convergência dos resultados em AMC III reforça que o framework não introduz pseudo-precisão espacial, mas responde de forma consistente às mudanças nos controles físicos do escoamento. Assim, as diferenças observadas em AMC I e II não representam ruído metodológico, mas sim a expressão de uma parametrização mais aderente aos processos hidrológicos locais.

3.3 Análise estatística comparativa entre o CN derivado pelo framework e o produto GCN250

A análise estatística das diferenças entre os valores de Curve Number (CN) derivados pelo framework proposto e aqueles obtidos a partir do produto global GCN250 evidencia padrões consistentes e hidrológicamente coerentes sob diferentes condições de umidade antecedente do solo (AMC I, II e III).

Em condição seca (AMC I), observou-se a maior dispersão dos valores de ΔCN , com diferenças variando de $-10,96$ a $+5,68$ e desvio-padrão de $4,13$. Esse comportamento indica elevada sensibilidade da resposta hidrológica às propriedades do solo, evidenciando a capacidade do framework de capturar a heterogeneidade pedológica em escala de sub-bacia. A presença de valores extremos reflete variações reais na textura do solo e não artefatos metodológicos.

Na condição média (AMC II), a amplitude e o desvio-padrão das diferenças diminuem, indicando redução progressiva da influência exclusiva do solo e maior participação do uso e cobertura do solo no controle do escoamento superficial. Ainda assim, o framework mantém maior capacidade discriminatória em relação ao GCN250.

Em condição úmida (AMC III), verifica-se forte convergência entre os dois produtos, com diferenças máximas inferiores a $\pm 1,1$ unidades de CN e desvio-padrão reduzido ($1,85$). Esse resultado confirma que, sob saturação do solo, o controle pedológico perde relevância, levando à convergência natural dos valores de CN, independentemente do método de parametrização.

O comportamento observado reforça a coerência física do framework proposto, que apresenta elevada sensibilidade em condições onde o solo exerce maior controle hidrológico e convergência progressiva à medida que o sistema se aproxima da saturação. Assim, as diferenças estatísticas identificadas não representam ruído metodológico, mas a expressão direta de uma parametrização mais aderente aos processos hidrológicos locais.

4. DISCUSSÃO

Este estudo eleva a parametrização do SCS-CN a um problema central, mitigando a aplicação acrítica da TR-55 em regiões tropicais. Demonstra-se que alta resolução isolada não garante coerência; sem harmonização multiescalar, a interpretação sofre com inconsistências físicas típicas de produtos globais. A harmonização mitiga a pseudo-precisão via reamostragem bilinear para solos e agregação zonal para precipitação, preservando o suporte físico original. A validação de campo do SoilGrids reforça a agenda PUB, tratando dados globais como estimativas iniciais. O método padroniza a definição do CN, reduzindo arbitrariedades em bacias não monitoradas.

4.1. Representação Urbana e Incertezas do Modelo

Reconhece-se que a natureza agregadora da classe Área Urbanizada (MapBiomas) e a resolução de $30m$ podem omitir superfícies impermeáveis finas, impactando a modelagem de microdrenagem. Para mitigar subestimações, o framework adota valores de CN da TR-55 baseados no percentual médio de impermeabilidade, embora projetos de alta precisão exijam camadas de *imperviousness* específicas.

Em cenários PUB, a impossibilidade de validação hidrométrica direta desloca o rigor para a análise de sensibilidade, que identifica a incerteza pedológica como o principal driver da variabilidade do CN. Simulações indicam que a transição entre Grupos Hidrológicos de Solo (GHS) A e B pode alterar o pico de vazão em até 15% para eventos com tempo de retorno de 50 anos. Assim, o framework oferece uma base física superior ao reduzir o erro sistemático da reamostragem arbitrária, garantindo aderência aos processos locais.

5. CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou que a principal limitação da aplicação contemporânea do método SCS-CN em bacias não monitoradas não reside na sua formulação matemática, mas na definição do parâmetro Curve Number. Embora as tabelas do TR-55 permaneçam fundamentais como referência conceitual, sua aplicação direta é insuficiente para representar adequadamente a complexidade fisiográfica e a dinâmica do uso do solo em regiões tropicais e semiáridas.

O framework metodológico proposto responde a essa lacuna ao estruturar explicitamente a parametrização do CN a partir de dados geoespaciais multiescalares, reduzindo incertezas estruturais, evitando pseudo-precisão espacial e ampliando a coerência física da modelagem hidrológica. Alinhado às diretrizes da iniciativa PUB, o framework oferece um procedimento replicável, transparente e adaptável a diferentes contextos regionais, contribuindo para o avanço da modelagem hidrológica aplicada em ambientes com escassez de dados monitorados.

REFERÊNCIAS

- JAAFAR, H. H.; AHMAD, F. A.; EL BEYROUTHY, N. GCN250 (2019) “*New global gridded curve numbers for hydrologic modeling and design*”. Scientific Data, v. 6, 145.
- SIVAPALAN, M. *et al.* (2003) “*IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012: shaping an exciting future for the hydrological sciences*”. Hydrological Sciences Journal, v. 48, n. 6, pp. 857–880.
- ROSS, C. W.; PRIHODKO, L.; ANCHANG, J. Y.; KUMAR, S.; JI, W.; HANAN, N. P. (2018) “*HYSOGs250m: Global gridded hydrologic soil groups for curve-number-based runoff modeling*”. Scientific Data, v. 5, n. 1, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.91>.
- SOUZA, C. M., Jr. *et al.* (2020) “*Reconstructing three decades of annual land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine*”. Remote Sensing, v. 12, n. 17, 2735.
- TUCCI, C. E. M (2012). *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4. ed. ABRH Porto Alegre-RS: 994 p.
- XAVIER, A. C., SCANLON, B. R., KING, C. W., & ALVES, A. I. (2022). “*New improved Brazilian daily weather gridded data*” (1961–2020). International Journal of Climatology, 42(16), 8390– 8404. <https://doi.org/10.1002/joc.7731>