



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge>



Assimilação de Dados Geoespaciais Aplicada à Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas de Pernambuco

Fellipe Henrique Borba Alves¹ e José Almir Cirilo²

1 – Doutorando em Engenharia Civil no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Rua Acadêmico Hélio Ramos, S/N, Cidade Universitária, CEP 50740-530, Recife-PE. fellipe.henrique@ufpe.br

2 – Professor Titular do Centro Acadêmico do Agreste (CAA) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Av. Marielle Franco, s/n - Km 59 - Nova, CEP 55014-900, Caruaru-PE, Brasil. E-mail: jose.cirilo@ufpe.br

Artigo recebido em 22/06/2024 e aceito em 25/08/2024

RESUMO

Produtos de sensoriamento remoto permitem obter características físicas e ambientais do planeta. Um conjunto desses produtos permite a caracterização fisiográfica de bacias hidrográficas e a integração com ferramentas computacionais através de técnicas de geoprocessamento e assimilação de dados. A assimilação de dados geoespaciais foi aplicada a partir da combinação de dados do projeto MapBiomass, mapas de solos do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) fornecidos pela Embrapa e do modelo digital do terreno da base Pernambuco Tridimensional (PE3D). A metodologia aplicada visa aproveitar o potencial de bases de dados abertos para caracterização de bacias hidrográficas e redução dos parâmetros calibráveis no modelo hidrológico HEC-HMS. A assimilação de dados aplicada à modelagem hidrológica foi realizada para dez bacias hidrográficas do estado de Pernambuco, cujas vazões simuladas foram avaliadas através de dados observados em 49 estações fluviométricas. Os principais resultados indicaram que a assimilação de dados geoespaciais permitiu simulações hidrológicas satisfatórias ou boas em 75% das estações avaliando os indicadores NSE, PBIAS e RSR. Resultados satisfatórios foram obtidos em estações fluviométricas de bacias hidrográficas com predominância de clima úmido e do semiárido. Desse modo, concluiu-se que a assimilação de dados geoespaciais permitiu caracterizar satisfatoriamente bacias hidrográficas no estado de Pernambuco e reduzir a necessidade de calibração de parâmetros no modelo hidrológico HEC-HMS, calibrando-se apenas a vazão de base. A acurácia das simulações de vazões consideradas insatisfatória possui um padrão geoespacial relacionado ao tipo de solos arenosos, sendo esta característica associada a taxas de infiltração elevadas e demanda de simulações hidrológicas intradiárias.

Palavras-chave: MapBiomass, Pernambuco Tridimensional, SiBCS, Geoprocessamento, HEC-HMS

Geospatial Data Assimilation Applied to Hydrological Modeling Watersheds in Pernambuco

ABSTRACT

Remote sensing products allow obtaining physical and environmental characteristics of the planet. A set of these products allows the physiographic characterization of river basins and integration with computational tools through geoprocessing and data assimilation techniques. The assimilation of geospatial data was applied based on the combination of data from the MapBiomass project, soil maps from the Brazilian Soil Classification System (SiBCS) provided by Embrapa and the digital terrain model from the Pernambuco Tridimensional database (PE3D). The applied methodology aims to take advantage of the potential of open databases for characterizing river basins and reducing the calibratable parameters in the HEC-HMS hydrological model. Data assimilation applied to hydrological modeling was performed for ten river basins in the state of Pernambuco, whose simulated flows were evaluated through data observed in 49 fluviometric stations. The main results indicated that the assimilation of geospatial data allowed satisfactory or good hydrological simulations in 75% of the stations evaluating the NSE, PBIAS and RSR indicators. Satisfactory results were obtained in fluviometric stations of hydrographic basins with a predominance of humid and semi-arid climate. Thus, it was concluded that the assimilation of geospatial data allowed a satisfactory characterization of hydrographic basins in the state of Pernambuco and reduced the need for parameter calibration in the HEC-HMS hydrological model, calibrating only the base flow. The accuracy of the flow simulations considered unsatisfactory has a geospatial pattern related to the type of sandy soils, this characteristic being associated with high infiltration rates and demand for intraday hydrological simulations.

Keywords: MapBiomass, Pernambuco Tridimensional, SiBCS, Geoprocessing, HEC-HMS

Introdução

O mapeamento e monitoramento das características e feições do planeta é um importante objetivo das pesquisas acompanhadas pela comunidade científica, tais objetivos impulsionam o desenvolvimento tecnológico e compreensão dos efeitos das mudanças climáticas, inclusive no que diz respeito aos padrões hidrometeorológicos (Guillod et al., 2018). A aquisição de dados geoespaciais através de satélites tornou-se uma ferramenta poderosa para caracterização global em múltiplas escalas e parâmetros (Peng e Liu, 2023).

O sensoriamento remoto integrado às técnicas de geoprocessamento pode fornecer informações relacionadas à altimetria (Nilsson e Nielsen, 2024), temperatura (Janeković et al., 2022), qualidade das águas (Pignotti et al., 2023), umidade do solo (Wakigari e Leconte, 2023), quantificação e previsão de precipitações (Zhang, 2022) ou caracterização do uso e ocupação do solo (Bogale et al., 2024).

Esse vasto conjunto de informações permite o desenvolvimento de ferramentas e modelos computacionais com potencialidades em constante evolução. Uma das formas de expandir as aplicações e qualidade das simulações computacionais é com a integração de informações e resultados através de assimilação de dados.

A assimilação de dados é uma técnica empregada para integrar de forma sinérgica dados observados e modelos numéricos visando melhorar a precisão de simulações e previsões para melhor compreensão dos sistemas naturais complexos. Este processo pode envolver a integração de diversas fontes de informação, tais como observações de satélite, observações terrestres ou simulações de outros modelos, para criar uma representação mais abrangente e confiável dos processos da Terra. A assimilação de dados é uma ligação entre os dados observados e as simulações computacionais.

Na meteorologia, a assimilação de dados é comumente aplicada na previsão do tempo. Os modelos meteorológicos assimilam observações em tempo quase real, como imagens de satélite e medições terrestres para ajustar as condições iniciais do modelo e melhorar as previsões de curto prazo. Chen, Huang e Yang (2021) desenvolveu previsões climáticas de seca a partir da combinação de dados de temperatura de brilho do SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) e previsões climáticas dados de anomalia de armazenamento de água no solo da base de dados GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment).

Na hidrologia, a assimilação de dados

possibilita uma grande combinação de possibilidades e estratégias metodológicas. Informações sobre as características fisiográficas da bacia podem ser obtidas com auxílio de informações de geoprocessamento (Castro e Maidment, 2020; Mariye et al., 2024). A variedade e sofisticação dos dados disponíveis têm possibilitado mudanças na forma de processar e analisar informações espaciais, a exemplo das séries históricas de precipitação e vazão (Alquraish e Khadr, 2021; Dastour e Hassan, 2023) e do balanço hídrico (Kolling Neto et al., 2024).

Os métodos de assimilação de dados podem agregar qualidade à caracterização física das bacias hidrográficas a partir da discretização de parâmetros associados à cobertura vegetal, relevo ou uso e ocupação do solo (Calvet et al., 2019).

No Brasil um conjunto de dados geoespaciais abertos encontra-se disponíveis para integração às simulações hidrológicas, a exemplo das bases MapBiomas (Souza et al., 2020), Pernambuco Tridimensional (Cirilo et al., 2014) e dos mapas de solos do Brasil (Embrapa, 2018).

O Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil (MapBiomas) é uma iniciativa que envolve uma rede colaborativa com especialistas em biomas (Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal), usos da terra, sensoriamento remoto, SIG e ciência da computação. O projeto utiliza processamento em nuvem e classificadores automatizados desenvolvidos e operados a partir da plataforma Google Earth Engine (GEE) para gerar uma série histórica de mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil.

O MapBiomas produziu 8 coleções de mapas anuais da Cobertura e Uso do Solo para todo o país, a coleção 8 foi publicada em agosto de 2023 e compreende o período de 1985 a 2022. O processamento utiliza a tecnologia de computação em nuvem do GEE, aplicando o algoritmo de classificação Random Forest sobre imagens do satélite Landsat, com resolução espacial de 30 m (Souza et al., 2020).

O potencial de aplicações a partir da série de dados de uso do solo é vasto, e passa por trabalho de monitoramento ambiental das áreas de mangue (Diniz et al., 2019), áreas irrigadas (Saraiva et al., 2019), degradação de vegetação nativa (Alencar et al., 2020) e previsão de cenários tendências de degradação (Fendrich et al., 2020). Além das aplicações citadas, vislumbra-se que as informações de uso e ocupação do solo do MapBiomas fornece um importante insumo para

simulações computacionais na área de hidrologia no território brasileiro.

A Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) possui atuação de destaque no desenvolvimento de tecnologias e práticas agrícolas sustentáveis, visando aumentar a produtividade e a competitividade da agricultura brasileira. Com uma rede de unidades de pesquisa distribuídas pelo país, a Embrapa atua em diversas áreas, incluindo melhoramento genético de plantas e animais, manejo de solos, recursos hídricos e tecnologias de produção. A instituição é reconhecida internacionalmente por suas contribuições significativas para a ciência agrícola e pelo impacto positivo no agronegócio brasileiro.

Os mapas de solos do Brasil, produzidos pela Embrapa, são ferramentas essenciais para o planejamento agrícola e a gestão sustentável dos recursos naturais. Esses mapas fornecem informações detalhadas sobre a distribuição, características e propriedades dos diferentes tipos de solo encontrados no território brasileiro.

Com base nesses dados, agricultores, pesquisadores e formuladores de políticas podem tomar decisões informadas sobre o uso da terra, práticas de manejo e conservação do solo. A Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SiBCS) compõe a cartografia de solos da Embrapa e contribui para a identificação de áreas aptas para diferentes culturas, bem como para a prevenção de problemas como erosão e degradação do solo, promovendo uma agricultura mais eficiente e sustentável no Brasil (Embrapa, 2018).

A base cartográfica do projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D) caracteriza o relevo do território pernambucano em detalhes sem precedentes. Segundo Cirilo et al. (2014) a base do PE3D dispõe de modelo digital do terreno (MDT) obtido através de perfilamento a laser e ortoimagens na escala 1:5.000. Os dados podem ser acessados gratuitamente por qualquer usuário.

A região nordeste do Brasil é caracterizada por sua irregularidade pluviométrica, apresentando períodos prolongados de seca e, por vezes, inundações severas. Tais características tornam a gestão dos recursos hídricos crucial para garantir o abastecimento de água potável, a produção de alimentos, a geração de energia elétrica e mitigar os efeitos das mudanças climáticas (Marengo et al., 2021).

Desse modo, os estudos apresentados a seguir possuem objetivo de aperfeiçoar as técnicas de geoprocessamento e assimilação de dados geoespaciais abertos disponíveis ao território brasileiro, bem como utilizá-los para

caracterização de bacias hidrográficas e desenvolvimento de modelos hidrológicos com menor necessidade de calibração de parâmetros.

Material e métodos

Área de estudo

O estado de Pernambuco possui uma área territorial de 98.068 km² segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018). Enquanto concepção de planejamento e gestão dos recursos hídricos, foi através do primeiro Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH) elaborado em 1998 e revisado em 2022, que o estado foi dividido em Unidades de Planejamento Hídrico (UP's), havendo atualmente 16 unidades vigentes (Pernambuco, 2022).

As UP's de Pernambuco podem ser subdivididas em rios litorâneos que possuem foz no oceano Atlântico: UP01 - Goiana, UP02 - Capibaribe, UP03 - Ipojuca UP04 - Sirinhaém, UP05 - Una, UP06 - Mundaú; e rios interiores: UP07 - Ipanema, UP08 - Moxotó, UP09 - Pajeú, UP10 - Terra Nova, UP11 - Brígida, UP12 - Garças e UP13 - Pontal, que drenam suas águas para o rio São Francisco (Pernambuco, 2022).

A área de estudo deste trabalho, conforme Figura 1, recobre 15 unidades de planejamento hídrico sobre as quais foi realizada caracterização fisiográfica a partir de produtos de sensoramento remoto, e em 10 destas unidades foram realizadas simulações hidrológicas para avaliar a assimilação de dados geoespaciais.

Modelagem hidrológica no HEC-HMS

O modelo hidrológico HEC-HMS, a partir da versão 4.4, passou a integrar ferramentas de geoprocessamento que permitem a delimitação de sub-bacias e rede drenagem. Neste trabalho, a modelagem hidrológica de cada bacia foi desenvolvida com a ferramenta computacional HEC-HMS 4.12.

Sequencialmente, após a criação da bacia hidrográfica a ser simulada, realizou-se o processamento das sub-bacias e rede de drenagem, através das ferramentas de informações geográficas disponíveis programa, utilizando-se o pré-processamento para preenchimento de depressões (Preprocess Sinks), identificação de rede de drenagem (Identify Streams), definição manual do exutório (Break Point Creation) e delimitação das sub-bacias (Delineate Elements).

Os métodos adotados para separação da precipitação efetiva, cálculo de perdas e transformação de chuva em vazão consideram o armazenamento de água na cobertura vegetal

(Canopy), o armazenamento de água na superfície (Surface), método de perdas de déficit constante

(Déficit Constant) e o método de transformação ModClark.

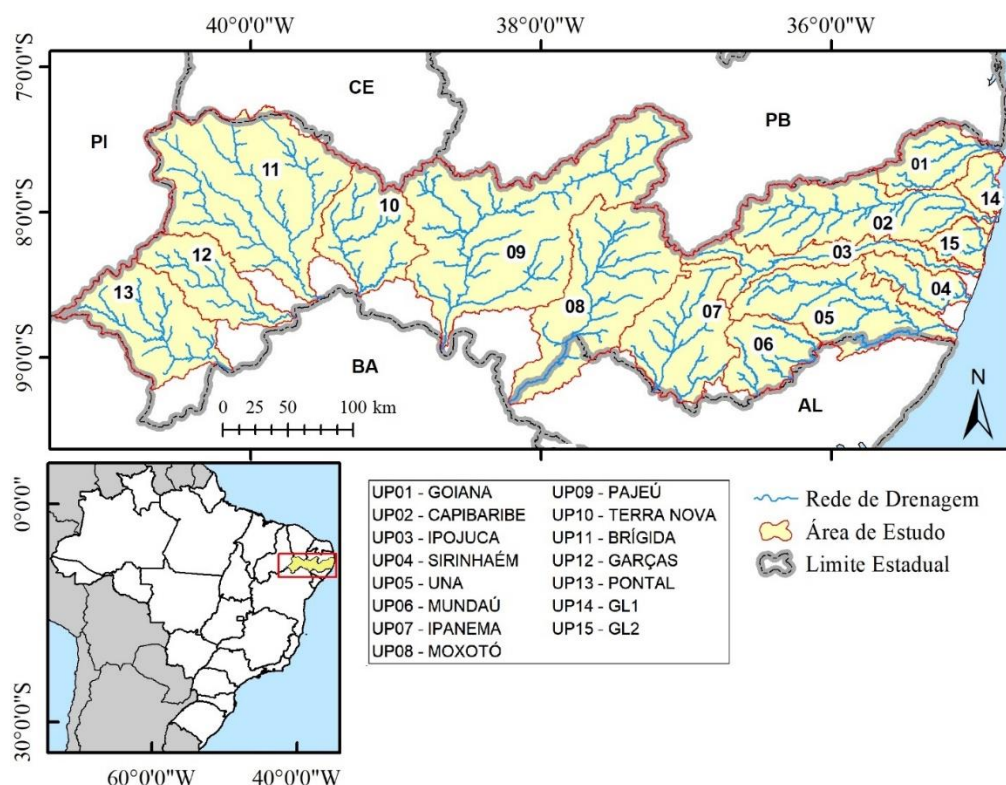


Figura 1. Localização de área de estudo e divisão de bacias hidrográficas.

As sub-bacias e a rede de drenagem das bacias hidrográficas modeladas foram exportadas como arquivo vetorial shapefile, sendo estas sub-bacias utilizadas para obtenção dos parâmetros de entrada do HEC-HMS, obtidos a partir de médias sobre os conjuntos de dados geoespaciais do MapBiomas, mapas de solos e PE3D.

A identificação das 10 unidades avaliadas através de modelagem hidrológica e suas respectivas áreas de drenagem encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Identificação de bacias hidrográficas modeladas no HEC-HMS e área de drenagem.

UP	Bacia	Área de drenagem, (km²)
01	Goiana	2.832
02	Capibaribe	7.523
03	Ipojuca	3.453
04	Sirinhaém	2.071
05	Una	6.693
06	Mundaú	3.121
07	Ipanema	6.115
08	Moxotó	9.727
09	Pajeú	16.854
15	GL-2	1.169

Séries históricas de dados hidrometeorológicos

Dados observados de precipitação foram obtidos através de séries históricas diárias coletadas em 462 pluviômetros, sendo 399 pluviômetros convencionais e 62 telepluviômetros, disponíveis nos sítios eletrônicos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (ANA, 2005) e da Agência Pernambucana de Águas e Clima (Apac) (Apac, 2021).

O conjunto de séries pluviométricas compreende o período de 01 de janeiro de 1990 a 31 de dezembro de 2020, e representam pontualmente recortes temporais distintos, podendo ou não conter registros em uma data específica.

As séries de precipitação foram armazenadas em uma base de dados com a extensão CSV (character-separated values) e um script em linguagem Python organizou os dados em arquivos individuais com os dados válidos para cada dia da série. Os arquivos de cada data armazenavam a lista de postos válidos, coordenadas e as precipitações diárias, de modo a permitir a interpolação dos dados pontuais resultando em arquivo matricial tipo raster com resolução espacial de 2 km. A interpolação dos dados de precipitação foi realizada através do método IDW (Inverse Distance Weighting),

aplicando o parâmetro de força padrão igual a 2.

As séries de vazões observadas é composta por 49 estações fluviométricas, obtidas através da plataforma Hidroweb da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

MapBiomias

A base de dados MapBiomias fornece uma base de dados de uso e ocupação do solo para todo o território brasileiro. O recorte dos dados referente ao MapBiomias Coleção 8 foi obtido no formato GeoTIFF, armazenando números inteiros positivos em 8 bits e resolução espacial de 30m. O recorte da

área de estudo foi realizado na plataforma Google Earth Engine, através da ferramenta MapBiomias User Toolkit 1.3.0 (Siqueira, 2020).

Entre as 30 classes disponíveis do nível mais detalhado do MapBiomias, 18 classes foram identificadas na área de estudo, conforme Figura 2, e fornecem um dos principais conjunto de dados geoespaciais utilizados no trabalho. A base do MapBiomias foi utilizada através de reclassificação ou combinada a outras bases de dados físicos, como os mapas de solos e Modelo Digital do Terreno (MDT) do Pernambuco Tridimensional.

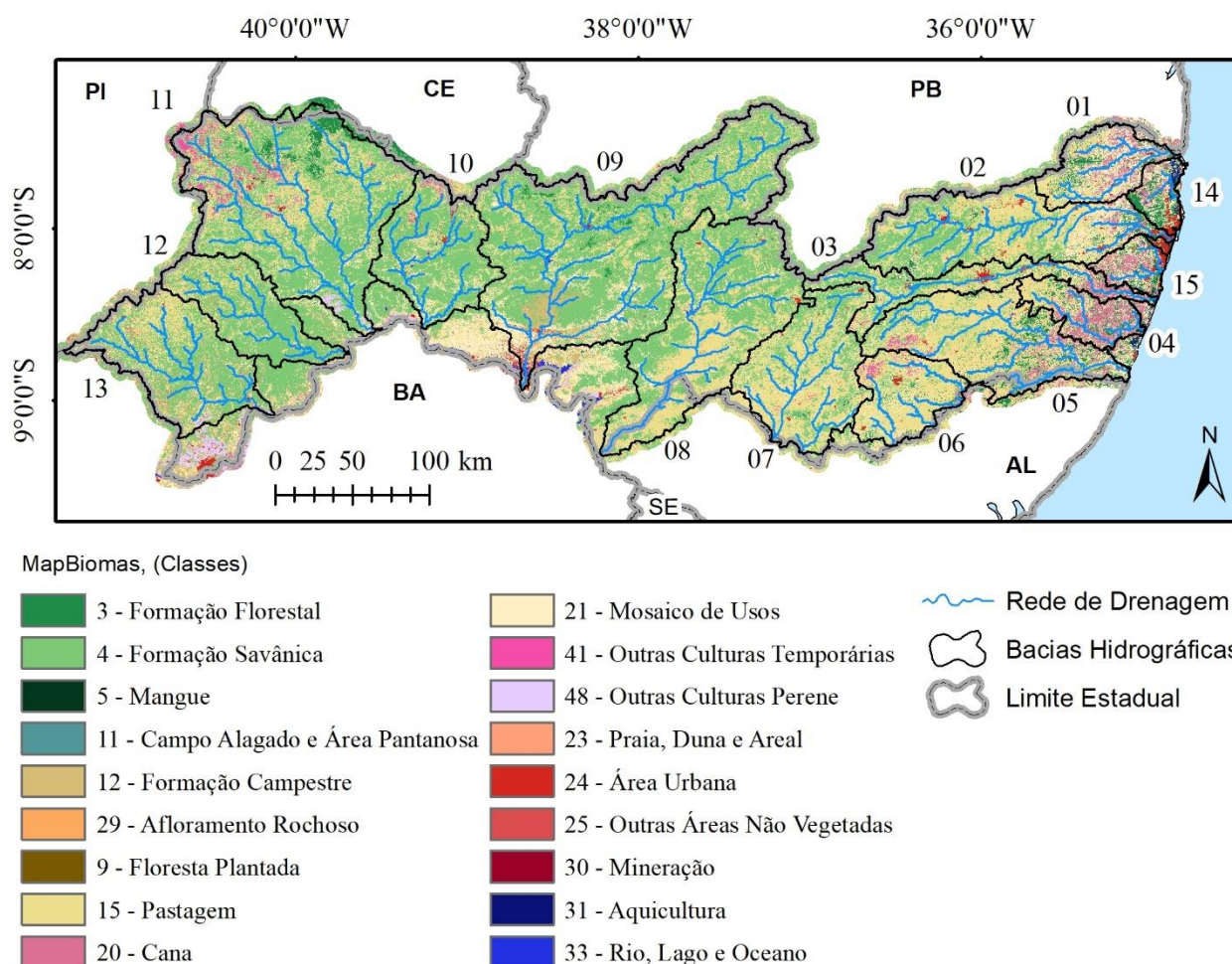


Figura 2. Uso e ocupação do solo a partir da base MapBiomias Coleção 8.

Caracterização da cobertura vegetal (Canopy)

A primeira componente a ser descrita na modelagem hidrológica do HEC-HMS está relacionada a cobertura vegetal das sub-bacias, sendo denominada Canopy. Esta componente recebe influência da interceptação da precipitação retida nas folhas e caules da vegetação, bem como a intensidade de extração de água do solo por esta vegetação.

A precipitação retida pela vegetação está sujeita a evapotranspiração e, embora opcional no

HEC-HMS, a componente Canopy passa a ser recomendada em simulações contínuas. Valores referencias da componente Canopy aplicados no HEC-HMS são apresentados por Fleming e Neary (2004) e Holberg (2014). Tais referências indicam a variação do armazenamento de água na cobertura vegetal entre 0 e 2,54 mm, as faixas de referência foram associadas ao MapBiomias conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2. Relação entre classes do MapBiomias e armazenamento de água na cobertura vegetal (Canopy).

ID	Classe MapBiomias	Canopy, (mm)
3	Formação Florestal	2,54
4	Formação Savânica	2,03
5	Mangue	2,54
9	Floresta Plantada	2,54
11	Campo Alagado e Área Pantanosa	2,54
12	Formação Campestre	1,27
13	Outras Formações Não Florestais	1,27
15	Pastagem	1,27
20	Cana	2,03
21	Mosaico de Usos	1,27
23	Praia, Duna e Areal	0
24	Infraestrutura Urbana	0
25	Outras Áreas Não Vegetadas	0
29	Afloramento Rochoso	0
30	Mineração	0
31	Aquicultura	0
33	Rio, Lago e Oceano	0
41	Outras Culturas Temporárias	2,03
48	Outras Culturas Perene	2,03
27	Não Observado	1,27

Armazenamento de água na superfície

O armazenamento de água na superfície (Surface) é um componente opcional que foi incluído no balanço hídrico de cada sub-bacia modelada no HEC-HMS e representa a água acumulada nas depressões do terreno. No HEC-HMS, o escoamento superficial começa quando a intensidade de precipitação for maior que a capacidade de infiltração do solo e a capacidade de armazenamento de água na superfície estiver atendida. A precipitação armazenada na superfície continua infiltrando em simulações contínuas e após os eventos de precipitação.

Fleming e Neary (2004) sugerem uma relação entre declividade e o armazenamento de água na superfície do HEC-HMS com variação de 1,0 mm para as áreas com declividade maior que 30%, até 50,8 mm, para as áreas consideradas planas, conforme faixas apresentadas na Tabela 3.

Observou-se que uma linha de tendência se ajusta quando os valores da Tabela 3 são plotados em escala logarítmica, e para estimar o armazenamento de água na superfície, a equação gerada foi aplicada a uma ferramenta de álgebra de

mapas tendo como entrada apenas a declividade, calculada percentual, a partir da base de dados do PE3D, reamostrada com resolução de espacial de 1m para 10m.

Tabela 3. Relação entre declividade e armazenamento de água na superfície.

Descrição	Declividade, (%)	Armazenamento de água na superfície, (mm)
Áreas planas	0 - 5	50,8
Declives suaves a moderados	5 - 30	12,7 – 6,4
Encostas suaves a íngremes	> 30	1,0
Áreas impermeáveis	-	3,2 – 6,4

As células com áreas impermeáveis tiveram a declividade de 30% atribuída de modo a resultar valores próximos a 6,4 mm.

Caracterização da taxa de infiltração

A taxa de infiltração (constant rate) define as taxas de infiltração e percolação enquanto a camada de solo estiver saturada. A condutividade hidráulica saturada é considerada uma boa aproximação para este parâmetro conforme proposto no manual do usuário do HEC-HMS (HEC, 2023), onde apresenta-se o estudo de Rawls, Brakensiek & Miller (1983) como referência para estimar este parâmetro a partir da textura do solo, conforme valores apresentados na Tabela 2.

Tabela 4. Relação entre classificação textural e condutividade hidráulica dos solos.

Textura do solo	Condutividade hidráulica saturada, (mm/h)
Arenosa	117,8
Arenosa Média	29,9
Média Arenosa	10,9
Média Siltosa	6,5
Média	3,4
Média Argilosa/Arenosa	1,5
Média Argilosa	1,0
Média Argilosa/Siltosa	1,0
Argilosa Arenosa	0,6
Argilosa Siltosa	0,5
Argilosa	0,3

A classificação textural dos solos é uma informação disponível no mapa de solos do

Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (Embrapa, 2018). Sendo assim, foi possível aplicar os valores da Tabela 4 através de correlação direta, havendo, no entanto, adaptações de algumas classificações do SiBCS que traziam descrições mais detalhadas que as apresentas como referência, a exemplo da presença de cascalho. Não foram identificados solos com classe textural siltosa.

Armazenamento de água no solo

No HEC-HMS, a opção do método de perdas definida como déficit constante demanda a determinação do déficit máximo que relaciona a quantidade total de precipitação que a camada de solo pode armazenar. Fisicamente, o limite superior do déficit máximo é a espessura da camada de solo multiplicada pela porosidade. No entanto, na maioria dos casos, essa estimativa pode ser reduzida quando houver algumas condições que

reduzam a capacidade de retenção de água.

O déficit máximo é comumente determinado através de calibração, porém neste trabalho foi utilizado como premissa à similaridade física com a capacidade máxima de armazenamento de água no solo (S), do método do Soil Conservation Service, conforme Equação 1, e uma redução proporcional a água disponível no solo.

Segundo USDA (2004a), no método do SCS, cada grupo de solo está associado a um valor CN (Curve Number) na condição de umidade II. A partir das informações de uso e ocupação do solo obtidas através do MapBiomas e da classificação hidrológica dos solos foi feita a classificação através da associação da classe MapBiomas aos valores de CN II, conforme associações indicadas na Tabela 5 elaborada com base nos valores de USDA (2004b).

Tabela 5. Relação entre MapBiomas e Curve Number (CN) em função da classificação hidrológica dos solos.

ID	Classe MapBiomas	Classe hidrológica dos solos			
		A	B	C	D
3	Formação Florestal	36	60	70	76
4	Formação Savânica	56	75	86	91
5	Mangue	26	52	62	69
6	Floresta Inundável	26	52	62	69
49	Restinga Arborizada	56	75	86	91
11	Campo Alagado e Área Pantanosa	26	52	62	69
12	Formação Campestre	36	60	73	79
32	Planície Salina	55	72	81	86
29	Afloramento Rochoso	98	98	98	98
50	Vegetação Herbácea de Restinga	56	75	86	91
13	Outras Formações Não Florestais	49	69	79	84
15	Pastagem	49	69	79	84
39	Soja	62	75	83	87
20	Cana	43	65	77	82
40	Arroz	62	75	83	87
41	Outras Culturas Temporárias	57	73	82	86
36	Culturas Perenes	64	76	84	88
46	Café	48	68	79	83
47	Citrus	48	68	79	83
48	Outras Culturas Perenes	64	76	84	88
9	Floresta Plantada	46	68	78	84
21	Mosaico de Usos	46	67	78	83
23	Praia, Duna e Areal	36	60	70	76
24	Área Urbana	77	85	90	92
30	Mineração	98	98	98	98
25	Outras Áreas Não Vegetadas	98	98	98	98
33	Rio, Lago e Oceano	100	100	100	100
31	Aquicultura	98	98	98	98
27	Não observado	56	75	86	91

Para determinar a capacidade de

armazenamento (S), utilizou-se recorte de mapa de

solos na escala 1:250.000 disponibilizado pelo IBGE, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2018). Os solos foram classificados em 4 classe hidrológicas, seguindo a Classificação Hidrológica dos Solos apresentada por Genovez, Lombardi e Sartori (2005).

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (1)$$

Onde:

S – Capacidade máxima de armazenamento de água no solo, em mm;
CN – Curve Number

A saída desta etapa indica o CN na condição de umidade II, mantendo-se a resolução espacial de 30 m da base MapBiomias.

Áreas impermeáveis

O percentual de áreas impermeáveis de cada sub-bacia foi identificado a partir da reclassificação binária do MapBiomias, onde cada classe recebeu o valor 0 ou 100.

As classes MapBiomias associadas a infraestrutura urbana (24); áreas não vegetadas (25); afloramento rochoso (29); mineração (30); aquicultura (31); rio, lago e oceano (33) tiveram o valor de 100% impermeável atribuído, enquanto as demais classes receberam o valor zero. Por fim, foi utilizada ferramenta álgebra de mapas para obter o valor médio desta reclassificação sobre a delimitação de cada sub-bacia.

Vazão de base

O método de vazão de base selecionado foi o Reservatório Linear, sendo assim definiu-se parâmetros para descarga inicial, a fração de precipitação armazenada em cada camada e a constante de armazenamento do Reservatório Linear. Todos estes parâmetros foram calibrados.

Indicadores de performance nas simulações hidrológicas

A avaliação da qualidade das simulações hidrológicas pode ser verificada através de

indicadores estatísticos. Diversos indicadores podem ser mais adequados para situações específicas, de modo a permitir avaliar a qualidade das vazões máximas, vazões mínimas ou erros percentuais do volume escoado.

Tendo em vista o número de bacias hidrográficas simuladas, optou-se por adotar os indicadores mais usuais às simulações hidrológicas e utilizados nas pesquisas correlatas anteriormente descritas. Para as séries de vazão calculadas no HEC-HMS através de simulações hidrológicas quase-distribuídas aplicou-se os indicadores de Nash-Sutcliffe (NSE), Percentual do viés de frequência (PBIAS) e Desvio Padrão da Raiz do Erro Quadrático Médio (RSR) conforme Equações 2, 3 e 4, descritas em Nash & Sutcliffe (1970), Moriasi et al. (2007), cujas faixas de performance estão indicadas na Tabela 6.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{cal})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (2)$$

$$PBIAS = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{cal})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{cal})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}} \quad (4)$$

Onde:

Q_{obs} - Vazão observada, m³/s

$\overline{Q_{obs}}$ - Vazão observada média, m³/s

Q_{cal} - Vazão calculada, m³/s

$\overline{Q_{cal}}$ - Vazão calculada média, m³/s

Tabela 6. Indicadores estatísticos para simulações de vazões e faixas de performance.

Performance	NSE	PBIAS	RSR
Muito boa	0,75 < NSE ≤ 1,00	PBIAS < ±5	0,00 ≤ RSR ≤ 0,50
Boa	0,65 < NSE ≤ 0,75	±5 ≤ PBIAS ≤ ±10	0,50 < RSR ≤ 0,60
Satisfatória	0,50 < NSE ≤ 0,65	±10 ≤ PBIAS ≤ ±15	0,60 < RSR ≤ 0,70
Insatisfatória	NSE ≤ 0,50	PBIAS ≥ ±15	RSR > 0,70

Para o NSE e R^2 , o valor ótimo é atingido quando os indicadores se aproximam de 1, enquanto para os indicadores PBIAS e RSR, o valor ótimo é 0.

O conjunto de indicadores foi aplicada para calibração de cada posto tendo como referência vazões observadas médias diárias sobre o calendário juliano para o período de dados disponível em cada posto, comparado com as vazões simuladas. A validação das simulações foi realizada avaliando o conjunto de indicadores de performance sobre as vazões diárias observadas e simuladas.

Resultados e discussão

Assimilação de dados geoespaciais na modelagem hidrológica

O armazenamento de água na cobertura vegetal foi calculado integralmente a partir dos valores de referência propostos por Fleming & Neary (2004) e Holberg (2014), com amplitude de 0 a 2,54 mm relacionada ao porte da vegetação. Os valores médios por bacia hidrográfica variaram de 1,45 mm na bacia hidrográfica do rio Mundaú (UP06) a 1,82 mm na bacia do rio Terra Nova (UP10). A Figura 3 apresenta a distribuição espacial do armazenamento de água na cobertura vegetal.

O armazenamento de água na superfície estimado a partir da declividade calculada em percentual a partir do Modelo Digital do Terreno da base cartográfica PE3D demonstrou maiores declividades nas bacias hidrográficas litorâneas, sendo 22,5% a maior declividade média encontrada para a bacia hidrográfica do rio Sirinhaém,

enquanto a bacia hidrográfica mais plana encontra-se em localização extremamente oposta à oeste, com 4,6% para a UP13 do rio Pontal, resultando respectivamente em armazenamento de água na superfície de 8 a 20 mm. O armazenamento de água na superfície é um recurso utilizado para estimar parte das perdas iniciais, sendo nas áreas planas onde haverá as maiores perdas.

Uma vez definido um valor fixo de armazenamento de água na superfície, este parâmetro funciona como um reservatório com uma capacidade representada em milímetros que se interliga ao balanço hídrico de modo a só ocorrer precipitações excedentes após o atendimento das demandas deste “reservatório” de superfície. A variação das declividades está ilustrada na Figura 4A e a distribuição do armazenamento de água na superfície para a área de estudo encontram-se na Figura 4B.

A declividade mostra as áreas planas e íngremes, e a correlação entre as depressões naturais e susceptibilidade ao escoamento superficial é coerente a partir desta declividade. No entanto, a existência de pequenas barragens é uma característica regional fortemente presente nas áreas de clima semiárido, chega à ordem de milhares de pequenos reservatórios e necessariamente se configura em um acréscimo aos valores calculados.

O armazenamento de água no solo é um parâmetro importante na definição da saturação do solo, e por consequência sua variação afetará de forma significativa a resposta sobre os primeiros eventos do período chuvoso.

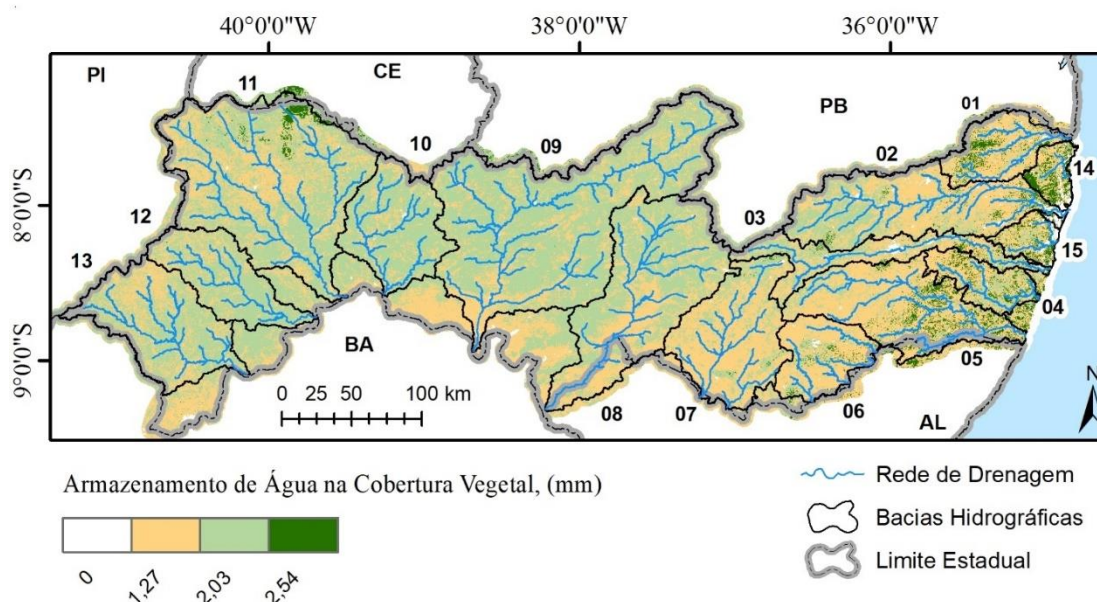


Figura 3. Armazenamento de água na cobertura vegetal a partir do MapBiomass, em mm.

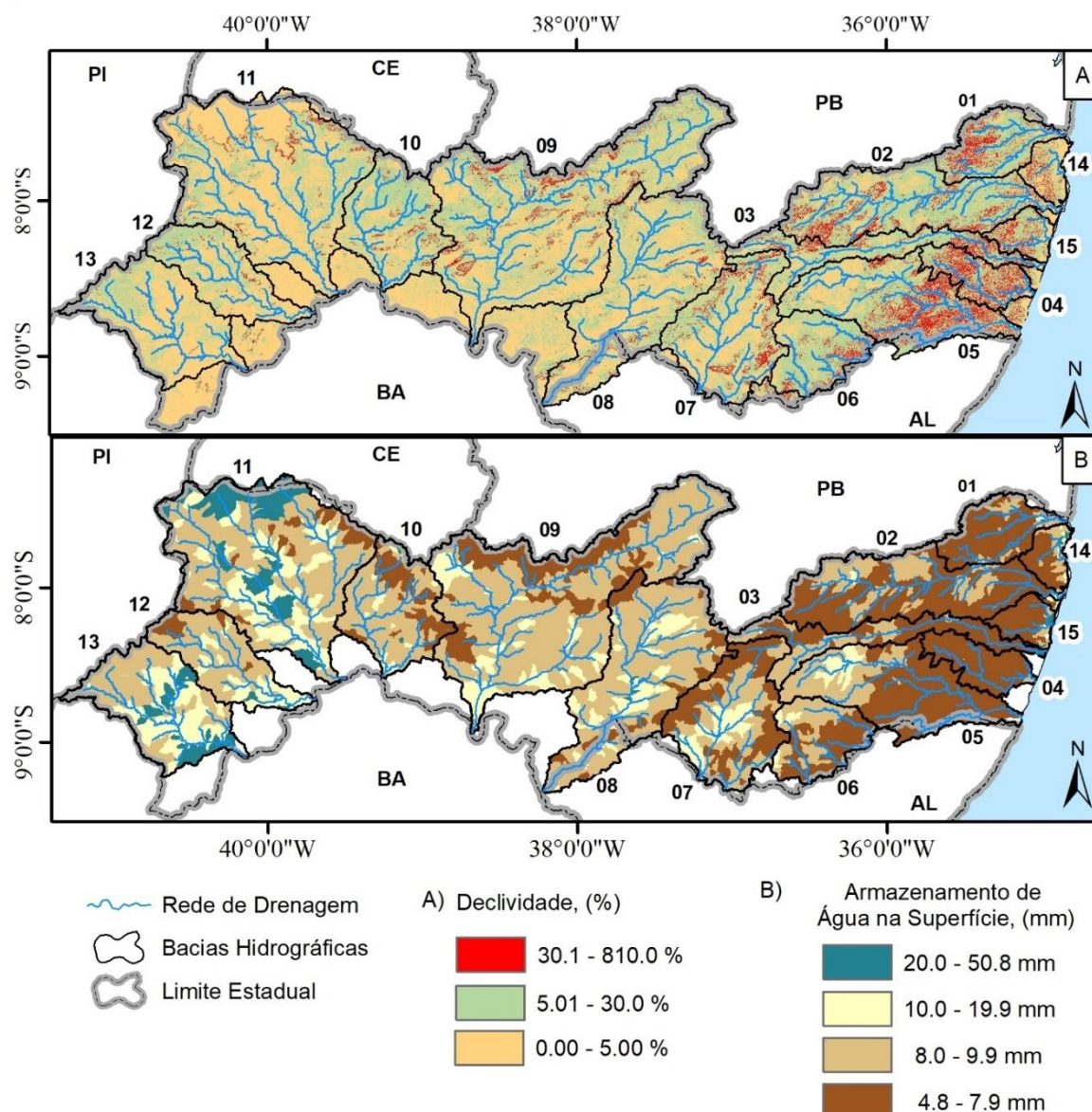


Figura 4. Armazenamento de água na superfície. A) Mapa de declividade (%), e B) Armazenamento de água na superfície em cada sub-bacia, em mm.

No método de perdas de Déficit Constante, a taxa de infiltração é um parâmetro que contribui para a definição das vazões de pico, sendo recomendado que a fase de calibração avalie os eventos extremos da série observada.

Por outro lado, as estimativas da taxa de infiltração para simulações no HEC-HMS possuem uma complexidade adicional, quando se observa a anisotropia dos solos e a sensibilidade deste parâmetro no método de Déficit Constante. A correlação entre a classificação textural dos solos e condutividade hidráulica saturada é o parâmetro físico do solo com maior afinidade à taxa de infiltração, sendo inicialmente aplicados os valores sugeridos por Rawls, Brakensiek, & Miller, (1983), porém na fase de calibração dos modelos tais

valores foram ajustados para algumas classes resultando os valores indicados na Tabela 7. Lu et al. (2024) apresentam estudo sobre os efeitos da condutividade hidráulica no escoamento subterrâneo em solos arenosos e argilosos.

Durante as simulações foi identificado que os solos com valor referencial de infiltração igual ou menor que 2,5 mm/h resultaram em vazões de pico elevadas em alguns eventos, motivo pelo qual foi realizado o ajuste. A espacialização da classificação textural dos solos e da condutividade hidráulica saturada média para cada sub-bacia encontra-se na Figura 5, onde observa-se predominância de solos com taxa de infiltração de 2 a 4 mm/h na região litorânea, de 15 a 30 mm/h na região agreste e de 4 a 10 mm/h na região do sertão.

Tabela 4. Relação entre classificação textural e condutividade hidráulica dos solos.

Textura do solo	Condutividade hidráulica ajustada, (mm/h)
Arenosa	30,0
Arenosa Média	15,0
Média Arenosa	10,0
Média Siltosa	5,0
Média	3,0
Média Argilosa/Arenosa	5,0
Média Argilosa	4,0
Média Argilosa/Siltosa	4,0
Argilosa Arenosa	4,0
Argilosa Siltosa	3,0
Argilosa	2,0

Será avaliado a seguir que tais faixas de condutividade hidráulica estão associadas à qualidade dos resultados das simulações hidrológicas, sendo as regiões de solos mais arenosos, com maior condutividade hidráulica, as áreas com predominância de resultados insatisfatórios ao representar as vazões.

Ao verificar solos com condutividade hidráulica de 15 a 30 mm/h, capacidade de armazenamento máximo de água no solo da ordem de 100 a 200 mm conclui-se que o armazenamento de água no solo pode variar de 0 a 100% em menos de 24 horas, motivo pelo qual verifica-se que em bacias com estas características seriam recomendadas simulações intradiárias.

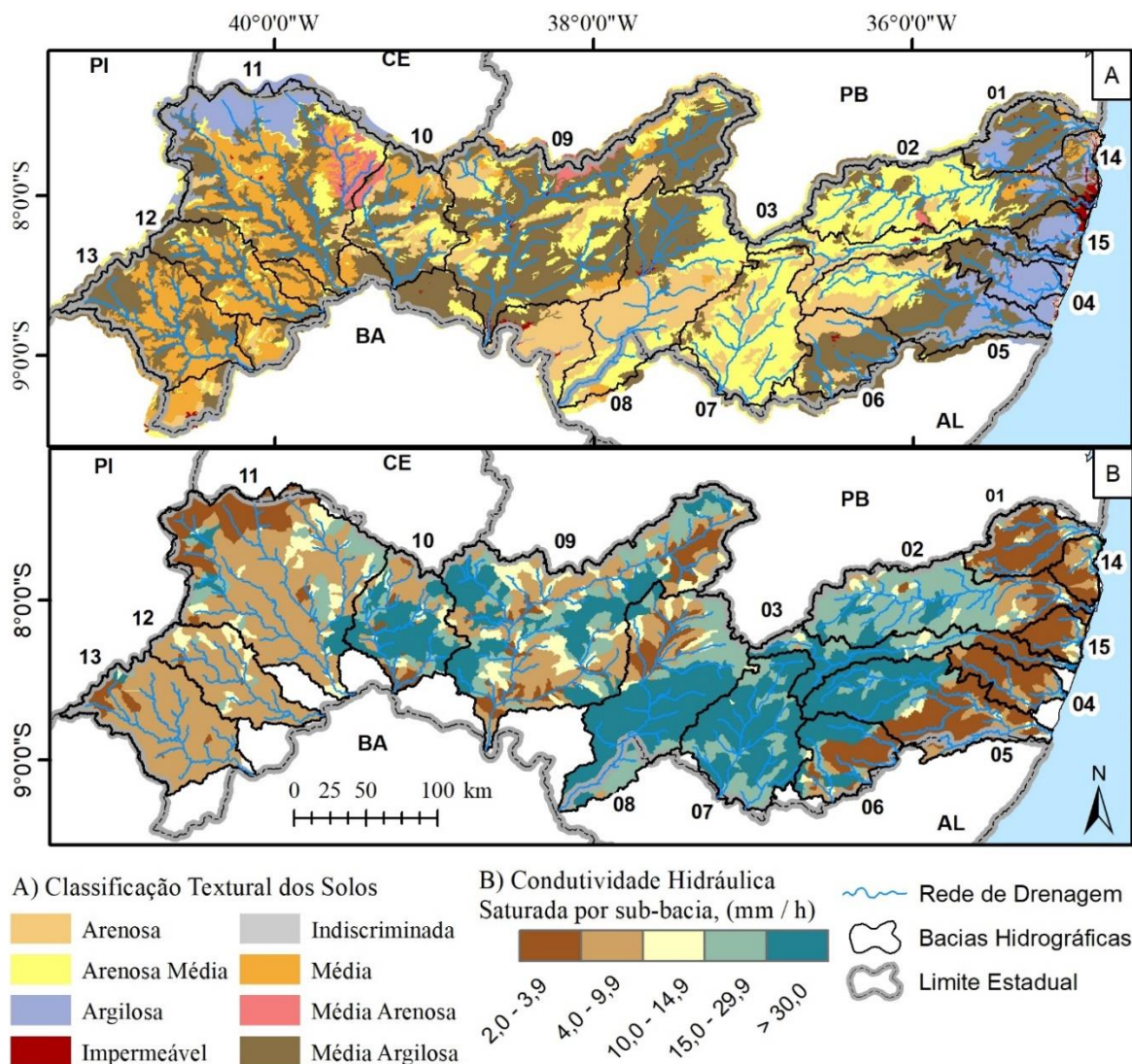


Figura 5. Condutividade hidráulica saturada estimada a partir da classificação textural dos solos. A) Classificação textural, e B) Condutividade hidráulica saturada por sub-bacia, em mm/h.

A distribuição espacial do armazenamento de água no solo para cada pixel com resolução espacial de 30 m é apresentada na Figura 6A, enquanto a Figura 6B apresenta o armazenamento de água para cada sub-bacia modelada no HEC-HMS, cuja amplitude variou de 5,5 a 473 mm.

Ainda na Figura 6 observa-se que na faixa litorânea ocorrem solos com maior capacidade de armazenamento que associado aos maiores índices pluviométricos ocasiona a formação de rios perenes. A bacia do rio Pajeú (UP09) foi a bacia que resultou em menor armazenamento de água nos solos, na ordem de 59,5 mm, enquanto a bacia do rio Sirinhaém registrou o maior armazenamento médio com 202,6 mm.

Os valores apresentados seguem a premissa de que o armazenamento máximo de água no solo calculado a partir do método do Soil Conservation Service (SCS) se dá na condição de umidade relacionada ao CN I. No entanto, durante a etapa de simulação hidrológica observou-se que tais valores não se adequam a todas as sub-bacias uma vez que a representação dos eventos hidrológicos se relaciona com a capacidade de armazenamento de água no solo, a taxa de infiltração para cada tipo de solo e a distribuição temporal dos eventos de chuvas em cada região.

Comumente, o armazenamento de água no solo é calculado para condição de umidade II, sendo este aderente a diversas situações.

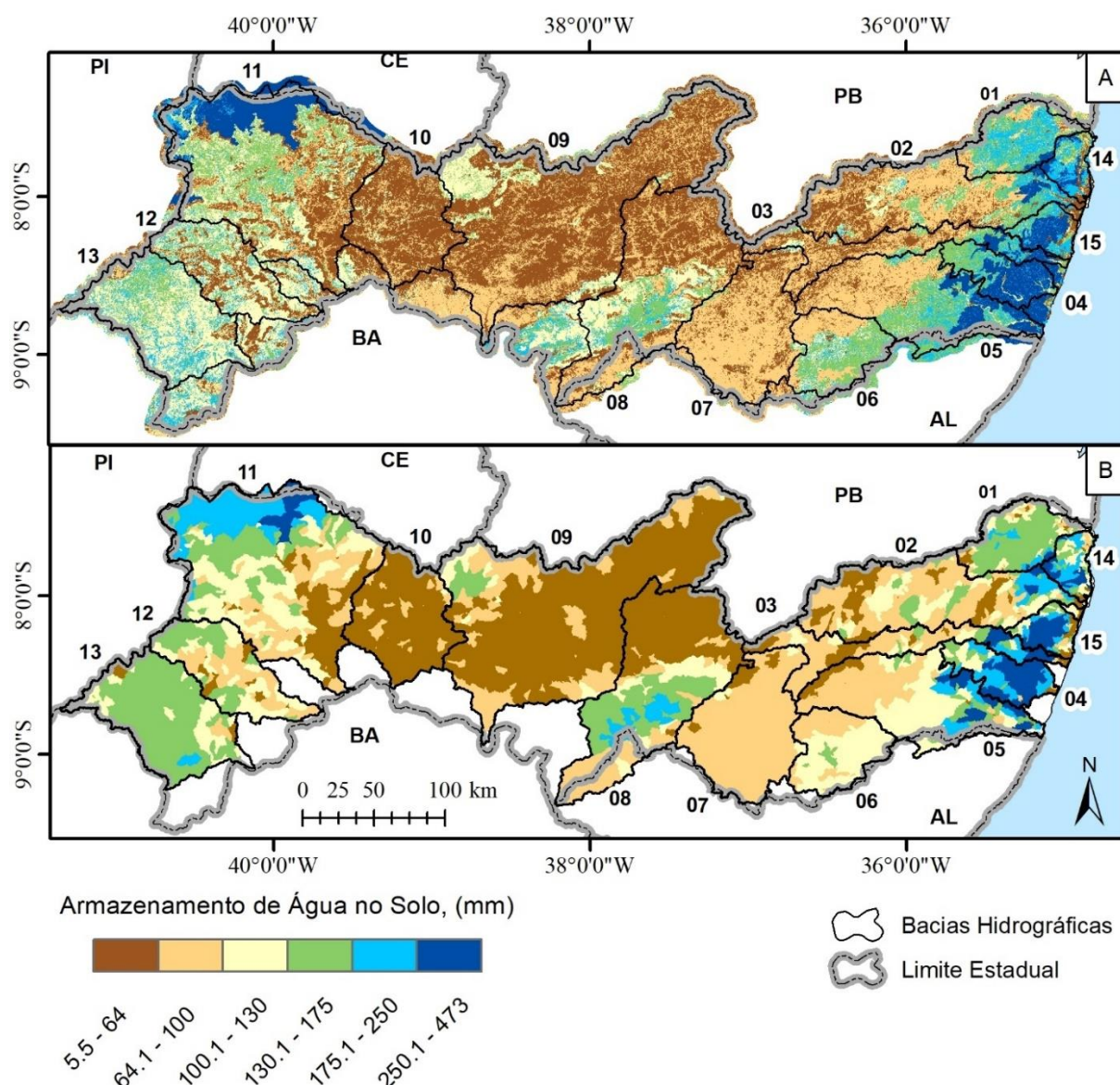


Figura 6. Armazenamento de água no solo. A) Armazenamento de água no solo em arquivo matricial com resolução de 30m e B) Armazenamento de água no solo por sub-bacia, em mm.

Os resultados encontrados permitiram observar que o valor do armazenamento de água no solo de performance nas simulações do HEC-HMS encontra-se entre a condição da umidade I e III, e uma relação linear com base na amplitude da água disponível no solo (AD) pode ser avaliada como método de ajuste. Walega et al. (2024) desenvolveram modelo hidrológico baseado no método SCS que permite calcular o escoamento direto a partir de dados de satélite.

Avaliação da acurácia das vazões simuladas

Uma vez concluído o processamento dos dados geoespaciais do Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D), do Projeto MapBiomias e do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) foram realizadas as simulações hidrológicas no modelo HEC-HMS.

A partir das simulações foi possível avaliar os resultados em regiões com características fisiográficas e climáticas distintas. Para representar estas regiões as bacias dos rios Sirinhaém, Una e Pajeú foram inicialmente analisadas e seus resultados foram avaliados em conjunto de modo a subsidiar eventuais ajustes e correções às considerações técnicas realizadas e fontes de referência disponíveis.

De modo geral, em avaliação qualitativa, foram observados resultados mais satisfatórios sobre as simulações nas bacias hidrográficas em regiões de clima úmido ante as regiões de clima semiárido. Alguns aspectos podem ser registrados ao buscar compreender esta situação.

A Figura 7 ilustra as vazões médias diárias de longo termo no calendário juliano para a estação

fluviométrica Engenho Mato Grosso, o melhor resultado entre as 49 estações com simulação de vazão modeladas no HEC-HMS. Nesta sub-bacia verifica-se que o balanço hídrico possui excedente de precipitações e ocasiona regime perene no rio Sirinhaém, onde também ocorre a predominância de solos argilosos e ausência de grandes reservatórios que interfiram no regime de vazões naturais.

A distribuição espacial dos indicadores de performance NSE, PBIAS e RSR obtidos para as 49 estações fluviométricas analisadas encontra-se na Figura 8.

Ao observar os indicadores de performance para validação dos resultados, tem-se que a estação Engenho Mato Grosso na registrou indicador de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) igual a 0,77, Desvio Padrão da Raiz do Erro Quadrático Médio (RSR) igual a 0,50 e o percentual de viés (PBIAS) de 1,4%, todos indicando uma simulação muito boa

Adicionalmente, foi observado que o método de transformação ModClark apresentada limitações relacionadas à taxa de infiltração de solos argilosos causando vazões de pico excessivas em eventos de chuvas intensas nos solos de baixa taxa de infiltração.

Em contraponto, o resultado mais desfavorável obtido nas simulações hidrológicas no HEC-HMS ocorreu para a estação Inajá, bacia hidrográfica do rio Moxotó. Neste posto fluviométrico o valor de NSE foi de -0,29, o RSR foi igual a 1,1 e o PBIAS foi igual a -19%, todos indicadores apontando para resultados insatisfatórios.

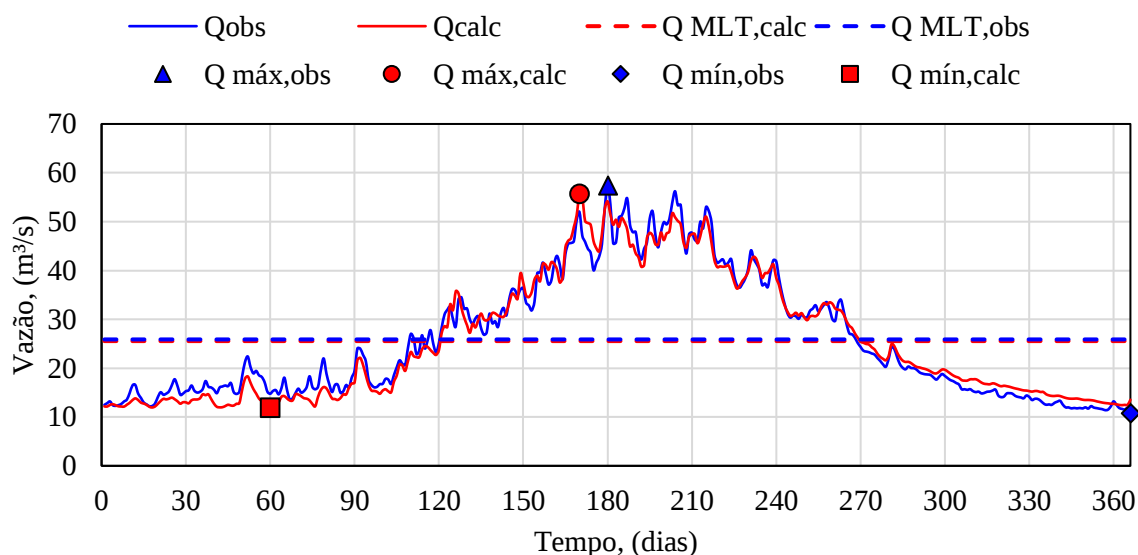


Figura 7. Vazões média diárias de longo termo observadas e simuladas no HEC-HMS para a estação Engenho Mato Grosso, bacia do rio Sirinhaém.

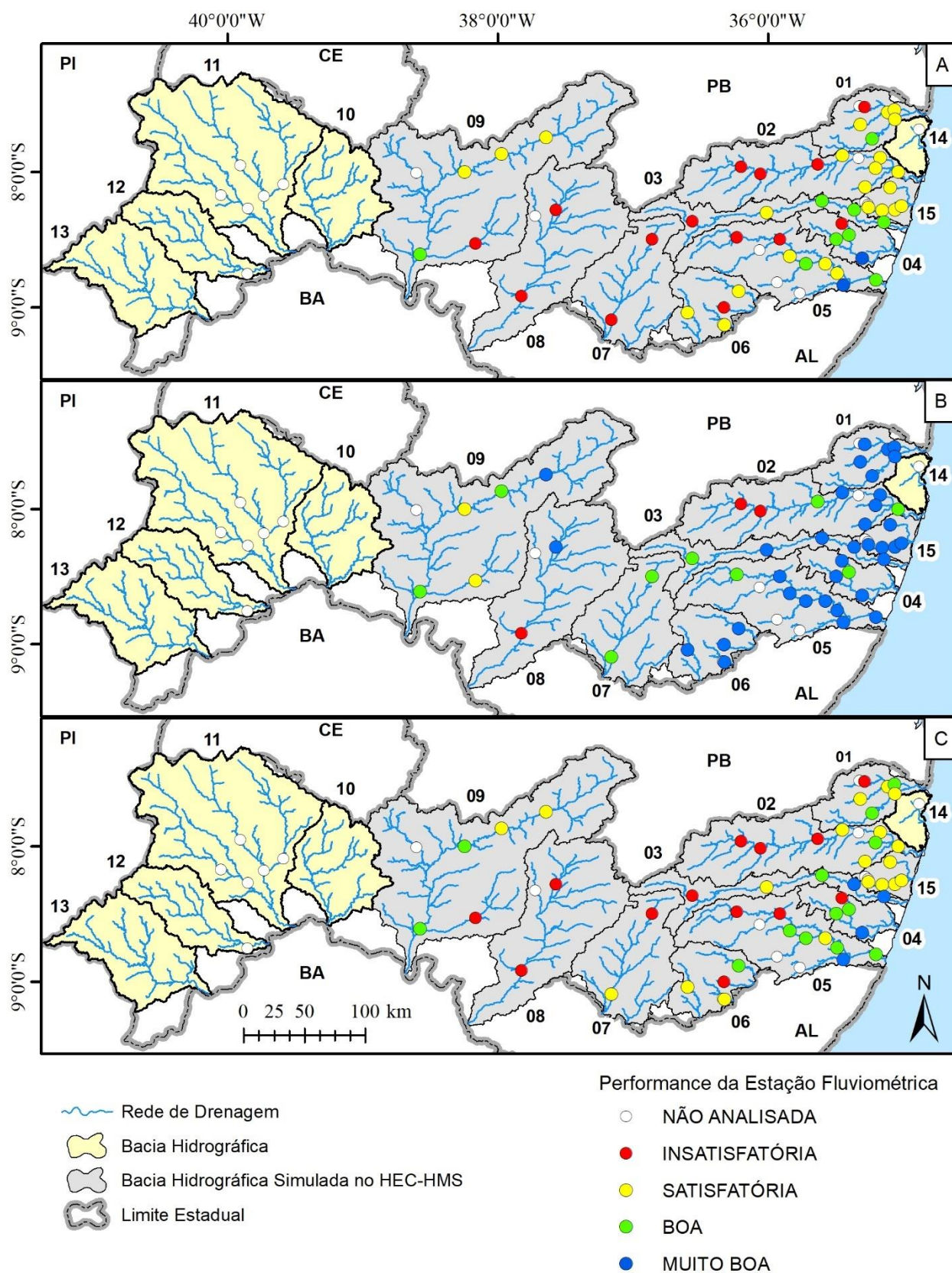


Figura 8. Distribuição espacial dos indicadores de performance de simulações hidrológicas A) NSE, B) PBIAS e C) RSR.

No caso da bacia hidrográfica do rio Moxotó, localizada em clima semiárido, cita-se algumas características que diferem das condições

da bacia de clima úmido do rio Sirinhaém. Para a bacia do Moxotó identifica-se predominância de solos com classificação textural arenosa e a

existência de muitos reservatórios que interferem nas vazões naturais, incluindo o reservatório Francisco Sabóia (Poço da Cruz), o maior em capacidade no Estado de Pernambuco, com cerca de 500 hm³.

Adicionalmente, verifica-se a recorrência de déficit de umidade no solo e uma maior variabilidade de normais climatológicas entre os meses, muitas vezes com o maior escoamento superficial no mês de fevereiro, redução de chuvas em março e novo aumento em abril. Em suma, foi verificado que as estações cujos resultados não foram satisfatórios possuem características de regiões com maior similaridade à estação Inajá. É provável que a condição de solos arenosos e elevada taxa de infiltração seja uma das condições mais desfavoráveis, associadas à aplicação de um intervalo computacional diário das simulações que não representa com precisão a saturação e geração de escoamento superficial direto nos solos arenosos.

Kang et al. (2024) propõe um modelo que descreve a variação da condutividade hidráulica em solos saturados e resultados apresentados no referido trabalho reforçam que a saturação de solos arenosos ocorre em intervalos intradiários.

Analisando os indicadores de performance das vazões geradas no HEC-HMS, em 49 estações fluviométricas, verifica-se que 37 estações (75%) tiveram performance satisfatória ou boa para o indicador NSE, as séries geradas em 44 estações (90%) tiveram resultados bons ou muito bons para o indicador PBIAS e 38 estações (77%) tiveram performance satisfatória ou boa para o indicador RSR.

Do total, 13 estações tiveram seus resultados considerados insatisfatórios para o NSE ou RSR, enquanto apenas 3 estações indicaram uma performance considerada insatisfatória quando ao PBIAS. Para estas regiões deve-se considerar, além das condições relevantes citadas, que podem estar contribuindo para tais resultados insatisfatórios, como a existência de centenas de pequenos reservatórios, a operação de grandes reservatórios para controle de cheias e abastecimento humano que podem alterar as vazões naturais, erros de medição nos dados observados ou a necessidade de calibrações específicas visando a melhoria dos resultados.

As estações fluviométricas não analisadas podem não possuir dados de vazão, séries históricas com menos de 10 anos ou descontinuidade de operação.

Conclusões

A partir dos resultados apresentados é possível concluir que:

A assimilação de dados geoespaciais abertos, combinando as bases dos projetos MapBiomas, Pernambuco Tridimensional e mapas de solos da Embrapa permitem a caracterização fisiográfica detalhada de bacias hidrográficas;

A assimilação de dados a partir de técnicas de geoprocessamento permite reduzir a calibração de parâmetros do modelo hidrológico HEC-HMS. A exemplo dos parâmetros de armazenamento de água na cobertura vegetal, armazenamento de água na superfície, armazenamento de água no solo e taxa de infiltração;

Modelos hidrológicos desenvolvidos no HEC-HMS podem gerar resultados satisfatórios apenas com a necessidade de calibração dos parâmetros de vazão de base;

A assimilação de dados geoespaciais permite resultados satisfatórios em bacias hidrográficas com predominância de clima úmido ou semiárido;

A metodologia aplicada registrou vazões simuladas no HEC-HMS com performance satisfatória ou boa em 75% das estações fluviométricas avaliadas através do NSE, PBIAS e RSR;

A calibração dos parâmetros associados à vazão de base favorece a precisão do volume escoado uma vez que o indicador PBIAS obteve performance boa ou muito boa em 90% das estações fluviométricas avaliadas;

Ao avaliar as características das estações fluviométricas com ocorrência de resultados satisfatórios e insatisfatórios verifica-se qualidade superior em solos mais argilosos e com menor taxa de infiltração, do que em solos mais arenosos e com taxa de infiltração mais elevada. Espera-se que condição poderá ser melhor avaliada através de simulações intradiárias.

Referências

- Alencar, A., Z. Shimbo, J., Lenti, F., Balzani Marques, C., Zimbres, B., Rosa, M., Arruda, V., Castro, I., Fernandes Márcico Ribeiro, J., Varela, V., Alencar, I., Piontekowski, V., Ribeiro, V., M. C. Bustamante, M., Eyji Sano, E., & Barroso, M. (2020). Mapping Three Decades of Changes in the Brazilian Savanna Native Vegetation Using Landsat Data Processed in the Google Earth Engine Platform. *Remote Sensing* (v. 12, n. 6, p. 924). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/rs12060924>

- Alquraish, M. M., & Khadr, M. (2021). Remote-Sensing-Based Streamflow Forecasting Using Artificial Neural Network and Support Vector Machine Models. *Remote Sensing* (v. 13, n. 20, p. 4147). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/rs13204147>. Acesso em 20 de julho de 2024.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2005. Plataforma Hidroweb. <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Acesso em: 18/08/2021.
- Apac. Agência Pernambucana de Águas e Clima, 2005. Plataforma Hidroweb. <http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php>. Acesso em: 18/08/2021.
- Bogale, T., Damene, S., Seyoum, A., & Haregeweyn, N. (2024). Land use land cover change intensity analysis for sustainable natural resources management: The case of northwestern highlands of Ethiopia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* (v. 34, p. 101170). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101170>. Acesso em 20 de julho de 2024.
- Castro, C. V., & Maidment, D. R. (2020). GIS preprocessing for rapid initialization of HEC-HMS hydrological basin models using web-based data services. *Environmental Modelling & Software* (v. 130, p. 104732). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104732>. Acesso em 20 de julho de 2024.
- Chen, W., Huang, C., & Yang, Z.-L. (2021). More severe drought detected by the assimilation of brightness temperature and terrestrial water storage anomalies in Texas during 2010–2013. *Journal of Hydrology* (v.603, p.126802). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126802>. Acesso em 20 de julho de 2024.
- Cirilo, J. A., Alves, F. H. B., Da Silva, L. A. C., & Campos, J. H. de A. L. (2014). Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial. *Revista Brasileira de Geografia Física* (v. 7, n. 4, p. 755–763). <https://doi.org/10.26848/rbgf.v7.4.p755-763>. Acesso em 20 de julho de 2024.
- Dastour, H., & Hassan, Q. K. (2023). A Machine-Learning Framework for Modeling and Predicting Monthly Streamflow Time Series. *Hydrology* (v. 10, n. 4, p. 95). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/hydrology10040095>. Acesso em 20 de julho de 2024.
- Diniz, C., Cortinhas, L., Nerino, G., Rodrigues, J., Sadeck, L., Adami, M., & Souza-Filho, P. W. M. (2019). Brazilian Mangrove Status: Three Decades of Satellite Data Analysis. In *Remote Sensing* (v. 11, n.7, p. 808). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/rs11070808>. Acesso em 20 de julho de 2024.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2018). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. E-book: Embrapa Solos, ISBN 978-85-7035-800-4. 355p. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/199517/1/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>. Acesso em 20 de julho de 2024.
- Fendrich, A. N., Barretto, A., de Faria, V. G., de Bastiani, F., Tenneson, K., Guedes Pinto, L. F., & Sparovek, G. (2020). Disclosing contrasting scenarios for future land cover in Brazil: Results from a high-resolution spatiotemporal model. *Science of The Total Environment* (v. 742, p. 140477). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140477>.
- Fleming, M., & Neary, V. (2004). Continuous Hydrologic Modeling Study with the Hydrologic Modeling System. *Journal of Hydrologic Engineering* (v. 9, Issue 3, p. 175–183). American Society of Civil Engineers (ASCE). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(2004\)9:3\(175\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(2004)9:3(175)).
- Genovez, A., NETO, F., & Sartori, A. (2005). Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* (v. 10, n. 4, p. 5–18). FapUNIFESP (SciELO). <https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n4.p5-18>. Acesso em 20 de julho de 2024.
- Guillod, B. P., Jones, R. G., Dadson, S. J., Coxon, G., Bussi, G., Freer, J., Kay, A. L., Massey, N. R., Sparrow, S. N., Wallom, D. C. H., Allen, M. R., & Hall, J. W. (2018). A large set of potential past, present and future hydro-meteorological time series for the UK. *Hydrology and Earth System Sciences* (v. 22, n. 1, p. 611–634). Copernicus GmbH. <https://doi.org/10.5194/hess-22-611-2018>. Acesso em 20 de julho de 2024.
- HEC. Hydrologic Engineering Center, 2023. Hydrologic modeling system. HEC-HMS User's Manual. Version 4.12. US Army Corps of Engineers, 671p, 2023. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/latest>. Acesso em 20 de julho de 2024.

- Holberg, J. (2014). Tutorial on using HEC-GeoHMS to develop Soil Moisture Accounting Method Inputs for HEC-HMS. Lyles School of Civil Engineering. Purdue University. https://web.ics.purdue.edu/~vmwade/education/hechms_sma.pdf Acesso em 20 de julho de 2024.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2018). Bases cartográficas contínuas. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/bases-cartograficas-continuas/15759-brasil.html?=&t=downloads> Acesso em 20 de julho de 2024.
- Janeković, I., Rayson, M. D., Jones, N. L., Watson, P., & Pattiaratchi, C. (2022). 4D-Var data assimilation using satellite sea surface temperature to improve the tidally-driven interior ocean dynamics estimates in the Indo-Australian Basin. *Ocean Modelling* (v. 171, p. 101969). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2022.101969> Acesso em 20 de julho de 2024.
- Kang, S., Fei, L., Zhong, Y., Zhao, P., Yang, Z., & Fan, Q. (2024). A modified Green-Ampt infiltration model for muddy water. *Em Journal of Hydrology* (v. 629, p. 130606). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130606> Acesso em 26 de julho de 2024.
- Kolling Neto, A., Ribeiro, R. B., Fraga, M. de S., & Pruski, F. F. (2024). Estimating water balance in a Brazilian semiarid watershed using different spatial data. *Journal of South American Earth Sciences* (v. 140, p. 104930). <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104930> Acesso em 26 de julho de 2024.
- Lu, Z., Wei, J., & Yang, X. (2024). Effects of hydraulic conductivity on simulating groundwater–land surface interactions over a typical endorheic river basin. *Em Journal of Hydrology* (v. 638, p. 131542). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131542> Acesso em 26 de julho de 2024.
- Mariye, M., Jianhua, L., Maryo, M., Tsegaye, G., & Aletaye, E. (2024). Remote sensing and GIS-based study of land use/cover dynamics, driving factors, and implications in southern Ethiopia, with special reference to the Legabora watershed. *Heliyon* (v. 10, n. 1, p. e23380). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23380> Acesso em 26 de julho de 2024.
- Marengo, J. A., Galdos, M. V., Challinor, A., Cunha, A. P., Marin, F. R., Vianna, M. dos S., Alvala, R. C. S., Alves, L. M., Moraes, O. L., & Bender, F. (2021). Drought in Northeast Brazil: A review of agricultural and policy adaptation options for food security. *Climate Resilience and Sustainability* (v. 1, n. 1). Wiley. <https://doi.org/10.1002/cli2.17> Acesso em 20 de julho de 2024.
- D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, & T. L. Veith. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE* (v. 50, n.3, p. 885–900). American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). <https://doi.org/10.13031/2013.23153> Acesso em 20 de julho de 2024.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology* (v. 10, n.3, p. 282–290). Elsevier BV. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6) Acesso em 20 de julho de 2024.
- Nilsson, B., & Nielsen, K. (2024). Validation of Sentinel-6MF based lake levels – An assessment with in situ data and other satellite altimetry data. *Advances in Space Research* (v. 73, n. 12, p. 5806–5821). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.04.006> Acesso em 20 de julho de 2024.
- Peng, D., & Liu, L. (2023). Importance of global spherical geometry for studying slab dynamics and evolution in models with data assimilation. *Earth-Science Reviews* (v. 241, p. 104414). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104414> Acesso em 20 de julho de 2024.
- Pignotti, G., Crawford, M., Han, E., Williams, M. R., & Chaubey, I. (2023). SMAP soil moisture data assimilation impacts on water quality and crop yield predictions in watershed modeling. *Journal of Hydrology* (v. 617, p. 129122). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129122>
- Pernambuco. Agência Pernambucana de Águas e Clima (Apac). 2022. Plano Estadual de Recursos Hídricos, 5 volumes, Recife, 2022. <https://www.apac.pe.gov.br/planos>
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., & Miller, N. (1983). Green-ampt Infiltration Parameters from Soils Data. *Journal of Hydraulic Engineering* (Vol. 109, Issue 1, p. 62–70). American Society of Civil Engineers (ASCE). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(1983\)109:1\(62\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(1983)109:1(62)) Acesso em 20 de julho de 2024.

- Saraiva, M., Protas, É., Salgado, M., & Souza, C. (2020). Automatic Mapping of Center Pivot Irrigation Systems from Satellite Images Using Deep Learning. *Remote Sensing* (v. 12, n.3, p. 558). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/rs12030558> Acesso em 20 de julho de 2024.
- Siqueira, J. MapBiomias Brazil collection release, 2020. <https://github.com/mapbiomas-brazil/user-toolkit> Acesso em 20 de julho de 2024.
- Souza, C. M., Jr., Z. Shimbo, J., Rosa, M. R., Parente, L. L., A. Alencar, A., Rudorff, B. F. T., Hasenack, H., Matsumoto, M., G. Ferreira, L., Souza-Filho, P. W. M., de Oliveira, S. W., Rocha, W. F., Fonseca, A. V., Marques, C. B., Diniz, C. G., Costa, D., Monteiro, D., Rosa, E. R., Vélez-Martin, E., Azevedo, T. (2020). Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. *Remote Sensing* (v. 12, n. 17, p. 2735). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/rs12172735> Acesso em 20 de julho de 2024.
- USDA. United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service - Part 630 Hydrology, National Engineering Handbook, Cap. 9, Hydrologic Soil-Cover Complexes, 2004a.
- USDA. United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service - Part 630 Hydrology, National Engineering Handbook, Cap.10: Estimation of Direct Runoff
- Wakigari, S. A., & Leconte, R. (2023). Exploring the utility of the downscaled SMAP soil moisture products in improving streamflow simulation. *Journal of Hydrology: Regional Studies* (v. 47, p. 101380). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101380> Acesso em 20 de julho de 2024.
- Wałęga, A., Wojkowski, J., Sojka, M., Amatya, D., Młyński, D., Panda, S., & Caldwell, P. (2024). Exploiting satellite data for total direct runoff prediction using CN-based MSME model. *Science of The Total Environment* (v. 908, p. 168391). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168391> Acesso em 26 de julho de 2024.
- Zhang, L., Xin, Z., Zhang, C., Song, C., & Zhou, H. (2022). Exploring the potential of satellite precipitation after bias correction in streamflow simulation in a semi-arid watershed in northeastern China. *Journal of Hydrology: Regional Studies* (v. 43, p. 101192). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101192> Acesso em 20 de julho de 2024.