



INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
Fluminense

MINISTÉRIO DA
EDUCAÇÃO



PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MODALIDADE PROFISSIONAL

ESTUDO GEOMORFOLÓGICO E HIDROLÓGICO DO RIO PARAÍBA DO SUL COM USO DE
GEOTECNOLOGIAS E MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO CHUVA-
VAZÃO

DHIEGO DA SILVA SALES

MACAÉ-RJ

2020

DHIEGO DA SILVA SALES

ESTUDO GEOMORFOLÓGICO E HIDROLÓGICO DO RIO PARAÍBA DO SUL COM USO DE
GEOTECNOLOGIAS E MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO CHUVA-
VAZÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, área de concentração Sustentabilidade Regional, linha de pesquisa Avaliação, Gestão e Conservação Ambiental.

Orientador: Dr. Jader Lugon Junior

Coorientador: Dr. Vicente de Paulo Santos de Oliveira

MACAÉ-RJ

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S163e Sales, Dhiego da Silva, 1986-.
Estudo geomorfológico e hidrológico do rio paraíba do sul com uso de geotecnologias e modelagem computacional para simulação chuva-vazão / Dhiego da Silva Sales. – Campos dos Goytacazes, RJ, 2020.
Xvii, 81 f.: il. color.

Orientador: Jader Lugon Junior, 1962-.
Coorientador: Vicente de Paulo Santos de Oliveira, 1965-.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Campos dos Goytacazes, RJ, 2020.
Inclui referências.

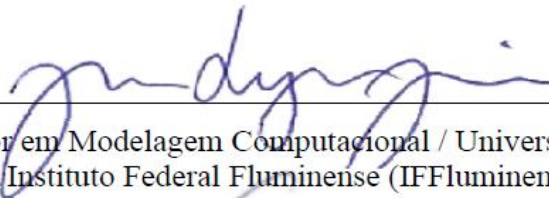
1. Hidrologia - Paraíba do Sul, Rio, Bacia. 2. Geomorfologia ambiental. 3. Engenharia geotécnica. 4. Sistemas de informação geográfica. 5. MOHID (Programa de Computador). 6. Correntes fluviais - Medição - Simulação por computador. 7. Precipitação (Meteorologia) - Variabilidade. 8. Chuvas. I. Lugon Junior, Jader, 1962-, orient. II. Oliveira, Vicente de Paulo Santos de, 1965-, coorient. III. Título.

CDD 551.483098153 23.ed.

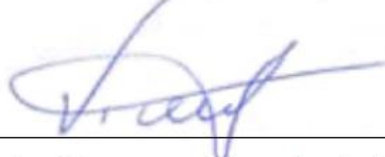
Dissertação intitulada **ESTUDO GEOMORFOLÓGICO E HIDROLÓGICO DO RIO PARAÍBA DO SUL COM USO DE GEOTECNOLOGIAS E MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO CHUVA-VAZÃO**, elaborada por **DHIEGO DA SILVA SALES** e apresentada, publicamente perante a Banca Examinadora, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal Fluminense - IFFluminense, na área concentração Sustentabilidade Regional, linha de pesquisa Avaliação, Gestão e Conservação Ambiental.

Aprovado em: 27 de março de 2020

Banca Examinadora:



Jader Lugon Junior, Doutor em Modelagem Computacional / Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Instituto Federal Fluminense (IFFluminense) – Orientador



Vicente de Paulo Santos de Oliveira, Doutor em Engenharia Agrícola / Universidade Federal de Viçosa (UFV), Instituto Federal Fluminense (IFFluminense) – Co-orientador



Antônio José da Silva Neto, Doutor em Engenharia Mecânica / North Carolina State University (NCSU), Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Instituto Politécnico (IPRJ)



Nivaldo Silveira Ferreira, Doutor em Meteorologia / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, especialmente meus pais e minha esposa Renata Sales.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me guiar, iluminar e me dar tranquilidade para seguir em frente com os meus objetivos e não desanimar com as dificuldades.

À minha amiga, esposa e parceira, Renata Sales, pelo incentivo, paciência e colaboração constante nesta caminhada.

Ao meu orientador, professor Jader, pela paciência, direcionamento e engajamento neste trabalho.

Ao professor Vicente pela colaboração e incentivo em superar minhas limitações.

Aos professores do programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal Fluminense – IFFluminense, pela disseminação do conhecimento e conselhos.

Ao Instituto Federal Fluminense, pela estrutura, ambiente criativo e amigável que proporciona.

Aos professores Antônio José da Silva Neto (IPRJ) e Nivaldo Silveira Ferreira (UENF), pelos conselhos e colaboração no trabalho.

Ao Instituto Politécnico da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), pela estrutura cedida e ambiente propício à inovação.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a Agência Nacional de Águas (ANA), ao Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (CEIVAP), ao Instituto de Pesquisa Espaciais (INPE) pela geração, manutenção e disponibilização dos dados utilizados no trabalho.

Ao Centro de Ciência e Tecnologia do Ambiente e do Mar (MARETEC) do Instituto Superior de Tecnologia (IST) vinculada a Universidade de Lisboa (UL), pela distribuição do MOHID.

A Bentley® pela distribuição gratuita da licença do MOHID *Studio*, para fins acadêmicos, por meio da parceria com o IFFluminense.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), responsável pela expansão e consolidação da pós-graduação *stricto sensu* no país.

A comunidade de desenvolvedores que disponibiliza, mantém e aprimora os *softwares* livres QGIS e RStudio.

EPÍGRAFE

“A menos que modifiquemos nossa maneira de pensar,
não seremos capazes de resolver os problemas causados
pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”

Albert Einstein

LISTA DE FIGURAS

APRESENTAÇÃO

Figura 1 – Fluxograma das etapas realizadas e fontes dos dados utilizados no Artigo 1.....	02
Figura 2 – Fluxograma das etapas realizadas e fontes dos dados utilizados no Artigo 2.....	03
Figura 3 – Fluxograma das etapas realizadas e fontes dos dados utilizados no Artigo 3.....	04

ARTIGO CIENTÍFICO 1

Figura 1 – Delimitação da área de interesse.....	09
Figura 2 – Principais tipologias dos canais fluviais.....	11
Figura 3 – Assinatura espectral da água e vegetação.....	18
Figura 4 – Comparação NIR x NDWI.....	18
Figura 5 – Evolução do decréscimo dos valores de nível do Rio Paraíba do Sul, coletados na estação fluviométrica da ANA, em Campos dos Goytacazes, entre 1990 e 2019.....	21
Figura 6 – Evolução do decréscimo dos valores de vazão do Rio Paraíba do Sul, coletados na estação fluviométrica da ANA, em Campos dos Goytacazes, entre 1990 e 2019.....	21
Figura 7 – Variações morfológicas no trecho de interesse entre os anos de 2005 e 2017.....	23

ARTIGO CIENTÍFICO 2

Figure 1 - Typical workflow for the WRF-ARW model.....	32
Figure 2 – Location of Paraíba do Sul River watershed and computational domain representation.....	34
Figure 3 – Distribution of INMET’s meteorological automatic stations within the Paraíba do Sul watershed.....	35
Figure 4 – Mean rainfall from 19 INMET automatic stations into the Paraíba do Sul watershed during 2018/2019 summer.....	35
Figure 5 – 72 hours of cumulative mean curves of the 4 best simulations and average observed data (January 3rd-6th, 2019).....	43
Figure 6 – 72 hours of hourly mean curves of the four best simulations and average observed data (January 3rd-6th, 2019).....	44
Figure 7: Accumulated Precipitation graphical representation for the Paraíba do Sul River Watershed.....	45

ARTIGO CIENTÍFICO 3

Figura 1 – Mapa de localização da Bacia do Rio Paraíba do Sul.....	54
Figura 2 – Arranjo dos domínios para construção do modelo.....	57
Figura 3 – Sistema de equações resolvido pelo MOHID <i>Land</i> , nas diferentes fases do ciclo hidrológico.....	58
Figura 4 – Bacia do Rio Paraíba do Sul gerada na interface do MOHID <i>Studio</i>	60
Figura 5 – Estimativa do Coeficiente de <i>Manning</i> gerado na interface do MOHID <i>Studio</i>	62
Figura 6 – <i>Curve Number</i> implementado na bacia modelada do Rio Paraíba do Sul no MOHID <i>Land</i>	65
Figura 7 – Esquema com os reservatórios instalados na Bacia do Rio Paraíba do Sul.....	67
Figura 8 – Distribuição das estações automáticas do INMET, com leitura horária, na Bacia do Rio Paraíba do Sul.....	69
Figura 9 – Desempenho da curva de recessão para a Bacia do Paraíba do Sul a partir da estimativa da constante de recessão k	72
Figura 10 – Separação do escoamento do hidrograma de vazão, a com a representação da vazão de base pelo Filtro de Chapman.....	73
Figura 11 – Resultado de vazão calculada x vazão observada para os diferentes cenários.....	76

LISTA DE TABELAS

ARTIGO CIENTÍFICO 1

Tabela 1– Uso do solo na bacia.....	12
Tabela 2 – Resolução espacial e espectral das 13 bandas.....	16
Tabela 3 – Validação da imagem do Sentinel-2 a partir da imagem do <i>Google Earth Pro</i>	19
Tabela 4 – Condições de cota no período de análise.....	22
Tabela 5 – Estatísticas das variações morfológicas no trecho de interesse entre os anos de 2005 e 2017.....	23

ARTIGO CIENTÍFICO 2

Table 1 – Physical parameterizations found in the literature for studies conducted with WRF-ARW, in the States of Rio de Janeiro and São Paulo, Brazil, between 2012 and 2017..	39
Table 2 – Result of experiments performed with the physical parameterizations previously used in the region of interest, Paraíba do Sul River Watershed.....	40
Table 3 – Experiments set up combining seven microphysical schemes and seven cumulus schemes.....	41
Table 4 – Results comparison for the experiments performed with the combination of seven microphysical schemes (section 2.3.2) and seven cumulus schemes.....	42

ARTIGO CIENTÍFICO 3

Tabela 1 – Seções transversais da ANA utilizadas para implementação no MOHID <i>Land</i>	61
Tabela 2 – Seções transversais definidas para cada ordem e implementadas no MOHID <i>Land</i>	61
Tabela 3 – Coeficiente de <i>Manning</i> atribuído para cada classe de Uso do Solo do IBGE (2016).....	63
Tabela 4 – <i>Curve Number</i> atribuído para cada classe de Uso do Solo do IBGE (2016), considerando um solo de textura A.....	64
Tabela 5 – Parametrizações físicas utilizadas no WRF-ARW por experimento.....	68
Tabela 6 – Cenários de chuva proposto para estudo de vazões na foz modelada do Rio Paraíba do Sul.....	70
Tabela 7 – Interpretação do coeficiente de correlação.....	71
Tabela 8 – Resultados dos testes estatísticos realizados por cenário de análise.....	74

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Reflectância
Φ'_i	Diferença entre o valor predito e valor observado
$\Phi'_{i,obs}$	Valor observado
$\Phi'_{i,p}$	Valor predito
A	Área da seção transversal
a	Parâmetro exponencial da equação de recessão
b	Escoamento subterrâneo
f	Escoamento superficial
k	Constante de recessão
N	Número de observações
n	Coefficiente de <i>Manning</i>
P	Precipitação ocorrida ao longo de um evento de chuva
Q	Vazão
Q'	Chuva efetiva
R	Coefficiente de correlação
R _h	Raio hidráulico
S	Declividade
S'	Máxima infiltração acumulada potencial
t	Tempo
y	Vazão total do hidrograma

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFWA	<i>Air Force Weather Agency</i>
AGRMET	<i>Agricultural Meteorology</i>
ANA	Agência Nacional de Águas
ARW	<i>Advanced Research WRF</i>
BMJ	Betts-Miller-Janjic
CEIVAP	Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul
CN	<i>Curve Number</i>
COHIDRO	Consultoria Estudos e Projetos
COPPETEC	Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos
DOS	<i>Dark Object Subtraction</i>
ESA	Agência Espacial Europeia
G3D	Grell 3D
GD	Grell-Devenyi
GF	Grell-Freita
GFS	<i>Global Forecast System</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
HDF5	<i>Hierarchical Data Format Version 5</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	<i>Inverse Distance Weighting</i>
IFF	Instituto Federal Fluminense
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto de Pesquisa Espaciais
IST	Instituto Superior Técnico
KF	Kain-Fritsch
MAE	<i>Mean Absolute Error</i>
MAPE	<i>Mean Absolute Percentage Error</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MOHID	Modelo Hidrodinâmico
NAM	<i>North American Model</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NDWI	<i>Normalized Difference Water Index</i>
NIR	<i>Near-infrared</i>
NMM	<i>Nonhydrostatic Mesoscale Model</i>
NT	<i>New Tiedtke</i>
PBL	<i>Planetary Boundary Layer</i>
QGIS	<i>Software Quantum GIS</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
RUC	<i>Rapid Update Cycle</i>
SCP	<i>Semi-Automatic Classification</i>
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SisBaHiA	Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental

SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TIN	<i>Triangulated Irregular Networks</i>
TOA	<i>Top of Atmosphere</i>
UK	<i>United Kingdom</i>
UL	Universidade Técnica de Lisboa
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i>
WPS	<i>WRF Pre-Processing System</i>
WRF	<i>Weather Research and Forecasting</i>
ZMRJ	Zona Metropolitana do Rio de Janeiro

ESTUDO GEOMORFOLÓGICO E HIDROLÓGICO DO RIO PARAÍBA DO SUL COM USO DE GEOTECNOLOGIAS E MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO CHUVA-VAZÃO

RESUMO

O presente trabalho consiste no estudo dos processos geomorfológicos e hidrológicos na Bacia do Rio Paraíba do Sul, para estudo preliminar da diminuição das vazões do rio principal, com o suporte de geotecnologias e modelagem computacional. Para diagnóstico do problema foram utilizadas técnicas de Sistema de Informação Geográfica (SIG), para o mapeamento espaço-temporal do deslocamento das margens e ilhas no baixo curso do rio Paraíba do Sul (65 km finais), onde a declividade e energia são menos intensas, a fim de se obter um panorama das mudanças geomorfológicas, entre os anos de 2005 e 2017. Após a espacialização dos efeitos da redução da vazão, portanto, do volume de água, na foz do rio principal, foram utilizadas técnicas de modelagem computacional a fim de se obter um modelo de toda a bacia estudada. Foram utilizados dois modelos: o *Weather Research and Forecasting* (WRF), para modelagem da distribuição espacial da precipitação pluviométrica e o modelo *MOHID land*, para a modelagem hidrológica. A modelagem da precipitação gerada pelo WRF foi implementada no *MOHID Land*, a fim de se obter dados espacializados de precipitação. Antes da implementação no modelo hidrológico, foram realizados testes de sensibilidade das parametrizações físicas disponíveis no WRF em 49 experimentos (livre associação de sete esquemas de microfísica e sete esquemas *cumulus*), sendo estes confrontados com os valores medidos nas estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) distribuídas na bacia, tendo sido encontrados um grupo de quatro experimentos estatisticamente semelhantes e que apresentaram desempenho satisfatório. A partir do teste de sensibilidade do modelo atmosférico foram gerados seis cenários hidrológicos com variação na entrada de dados de precipitação, sendo quatro oriundos do teste de sensibilidade do modelo atmosférico e, adicionalmente, outros dois, com dados reais de chuva medidos nas estações automáticas do INMET e interpolados pelos métodos *Inverse Distance Weighting* (IDW) e *Triangulated Irregular Networks* (TIN), respectivamente. Os resultados apresentaram uma tendência do rio a mudar sua morfologia em função da diminuição do espelho d'água na ordem de 2,26 km², bem como, o decréscimo de sua largura média na ordem de 34,75 m. Para a simulação de vazão foi observado que os dados de precipitação modelados pelo WRF foram mais eficazes que os métodos de interpolação.

Palavras-chave: Geomorfologia ambiental. Engenharia geotécnica. Modelagem hidrológica. Modelagem atmosférica. Simulação chuva-vazão.

**GEOMORPHOLOGICAL AND HYDROLOGICAL STUDY OF THE PARAÍBA DO SUL RIVER
WITH USE OF GEOTECHNOLOGIES AND COMPUTATIONAL MODELING FOR
RAINFALL/CHANNEL FLOW SIMULATION**

ABSTRACT

The present research aimed of the study of the geomorphological and hydrological processes in the Paraíba do Sul River Watershed, for preliminary study of the reduction of the channel flows of the main river, with the support of geotechnologies and computational modeling. In order to diagnose the problem, Geographic Information System (GIS) techniques were used to map the space-time displacement of the banks and islands in the lower course of the Paraíba do Sul River (last 65 km), where the slope and energy are less intense, in order to obtain an overview of the geomorphological changes, between the years 2005 and 2017. After the spatialization of the effects of the reduction of the channel flow, therefore, of the volume of water, at the mouth of the main river, computer modeling techniques in order to obtain a model of the entire studied watershed. Two models were used: Weather Research and Forecasting (WRF), for modeling the spatial distribution of rainfall, and the MOHID land model, for hydrological modeling. The precipitation modeling generated by the WRF was implemented in MOHID Land, in order to obtain spatialized precipitation data. Previously to implementation in the hydrological model, sensitivity tests of the physical parameterizations available in the WRF were carried out in 49 experiments (free association of seven microphysics schemes and seven cumulus schemes), these being compared with the values measured in the automatic stations of the National Institute of Meteorology (INMET) distributed in the watershed, having been found a group of four experiments statistically similar and that presented satisfactory performance. From the sensitivity test of the atmospheric model, six hydrological scenarios were generated with variation in the input of precipitation data, four from the sensitivity test of the atmospheric model and, in addition, two others, with real rain data measured in the automatic stations of the INMET and interpolated by the Inverse Distance Weighting (IDW) and Triangulated Irregular Networks (TIN) methods, respectively. The results showed a tendency for the river to change its morphology due to the decrease in the water mirror in the order of 2.26 km², as well as the decrease in its average width in the order of 34.75 m. For the flow simulation, it was observed that the precipitation data modeled by the WRF were more effective than the interpolation methods.

Keywords: *Environmental geomorphology. Geotechnical engineering. Hydrological modeling. Atmospheric modeling. Rain-flow simulation.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xii
RESUMO.....	xiv
<i>ABSTRACT</i>	xv
APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	01
ARTIGO CIENTÍFICO 1: GEOTECNOLOGIAS COMO SUPORTE AO DIAGNÓSTICO DA DINÂMICA GEOMORFOLÓGICA-FLUVIAL DO BAIXO CURSO DO RIO PARAÍBA DO SUL.....	06
1. INTRODUÇÃO.....	07
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	08
2.1. Caracterização e localização.....	08
2.2. Tipologia do canal no trecho de interesse.....	09
2.3. Uso do solo, processo erosivo e produção de sedimentos.....	11
2.4. Geotecnologias, geomorfologia fluvial e modelagem computacional.....	13
3. METODOLOGIA.....	14
3.1. Séries históricas de vazão e nível.....	14
3.2. Determinação das datas de análise e sensor orbital.....	15
3.3. Processamento das imagens orbitais.....	17
3.4. Validação: Comparação Google Earth x Sentinel-2.....	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	19
4.1. Tendência hidrológicas.....	19
4.2. Variações morfológicas entre junho de 2005 e janeiro de 2017.....	21
5. CONCLUSÃO.....	24
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	25
ARTIGO CIENTÍFICO 2: QUANTITATIVE EVALUATION OF ATMOSPHERIC PHENOMENA MODELS FOR PRECIPITATION ASSESSMENT IN THE PARAÍBA DO SUL WATERSHED.....	28
1. INTRODUCTION.....	29
2. MATERIALS AND METHODS.....	31

2.1. WRF model description.....	31
2.2. WRF experiment design.....	33
2.3. Cumulus and Microphysical Parameterization Sets.....	35
2.3.1 Cumulus Schemes Short Description.....	36
2.3.2 Microphysical Schemes Short Description.....	37
2.4 Verification methods.....	37
3. RESULTS AND DISCUSSION.....	39
3.1. Sensitivity Analysis Assessment of physical parameterization using previous studies in the region.....	39
3.2 Sensitivity Analysis Assessment of Cumulus and Microphysics parameterization.....	40
4. CONCLUSIONS.....	46
5. REFERENCES.....	47
ARTIGO CIENTÍFICO 3:	
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE VAZÕES NO RIO PARAÍBA DO SUL - BRASIL UTILIZANDO O MODELO HIDROLÓGICO MOHID <i>LAND</i> E O MODELO ATMOSFÉRICO WRF-ARW.....	50
1. INTRODUÇÃO.....	51
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	54
2.1. Área de estudo: Bacia do Rio Paraíba do Sul.....	54
2.2. Modelagem atmosférica: Modelo WRF	55
2.2.1. Configuração do modelo WRF.....	57
2.3. Modelagem hidrológico: MOHID <i>Land</i>	58
2.3.1 Criação do modelo digital de elevação, delimitação da bacia e rede de drenagem.....	59
2.3.2 Ajuste das seções transversais.....	60
2.3.3 Ajuste do coeficiente de rugosidade.....	61
2.3.4 Ajuste dos processos de infiltração.....	63
2.3.5. Ajuste da vazão de base.....	65
2.3.6 Implementação dos reservatórios.....	67
2.4 Cenários de simulação.....	67
2.4.1 Cenários com chuva modelada no WRF-ARW.....	68
2.4.2 Cenários com chuva medida nas estações oficiais do INMET.....	69
2.5 Método de análise.....	70
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	72
3.1 Definição da base de base por meio do filtro de Chapman.....	72
3.2. Simulação de vazão com os cenários de chuva propostos.....	73

4. CONCLUSÃO.....	77
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78

APRESENTAÇÃO

A intervenção humana nas áreas adjacentes aos cursos dos rios, seja na construção de diques, na remoção de cobertura vegetal nativa, em razão da expansão da atividade agropecuária, ou mesmo para a expansão das cidades, alicerçada na lógica do desenvolvimento das civilizações, tem contribuído para ocorrência de grandes modificações na paisagem e, por consequência, para mudanças significativas na geomorfologia dos cursos d'água, bem como, na disponibilidade hídrica.

O estudo das bacias hidrográficas vem ganhando força nas últimas décadas, notadamente a partir da institucionalização desta como unidade de gestão, a partir da Política Nacional de Recursos Hídricos. Sendo uma temática multidisciplinar e de ação coletiva, a gestão das águas representa uma temática sempre presente e permeada por conflitos, a partir dos usos múltiplos e de interesses quase sempre conflitantes, cabendo uma gestão pública participativa para mediar os conflitos, especialmente quando se trata de bacias federais, como a do Rio Paraíba do Sul, que ultrapassa o limite de três estados.

O estudo sistemático dos processos geomorfológicos da Bacia do Rio Paraíba do Sul é de extrema importância, na medida em que estes processos naturais, estão sendo fortemente potencializados pela ação antrópica, gerando consequências diversas para população presente na bacia hidrográfica ou no caso, dessa extensa bacia, para grande população fora dela, como acontece na zona metropolitana do Rio de Janeiro, que apesar de não estar inserida na bacia, faz uso de suas águas a partir de transposições. Os processos erosivos estão fortemente relacionados com o uso e ocupação do solo, assim como o transporte de sedimentos na calha do rio e os assoreamentos nos baixos cursos, onde a declividade, portanto a velocidade, é mais baixa. Associada a esta condição de erosão/deposição, destaca-se ainda a crescente demanda pela água em função do desenvolvimento das cidades, indústria, expansão das fronteiras agrícolas, aumento populacional, que leva a uma diminuição do volume de água, logo da capacidade de transporte dos rios, ocasionando em assoreamentos e diminuição de vazão.

Partindo da premissa de que as intervenções ocasionadas pela ação humana atuam no desequilíbrio dos ecossistemas naturais, esta dissertação lança mão de ferramentas de geotecnologias, compostas de sensoriamento remoto, geoprocessamento e modelagem computacional da bacia do Rio Paraíba do Sul para estudo das vazões.

Esta pesquisa foi dividida em três partes, que serão apresentadas na forma de artigos científicos e compõem a presente dissertação.

O primeiro artigo científico, já publicado na revista científica *Mix Sustentável*, ISSN: 2447-0899, *website* <http://www.nexos.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/issue/view/243>, teve como

objetivo apresentar um diagnóstico do comportamento geomorfológico baixo curso do Rio Paraíba do Sul, nos últimos 65 km, relacionando com a perda de vazão na foz. A pesquisa pretendeu utilizar ferramentas de geotecnologias a fim de se obter dados históricos acerca das variações geomorfológicas do canal e das ilhas, apresentando mapas de sedimentação e deslocamento das margens. A escolha deste tipo de análise, no baixo curso, se deu em função das características da erosão hídrica a montante e posterior transporte de sedimentos na bacia, que em um contexto amplo, pode ser entendida como a transferência de matéria oriunda da desestabilização de agregados do solo, ao longo do tempo geológico, sendo transportadas para regiões mais rebaixadas até a deposição nas bacias sedimentares. Sendo a região do norte-fluminense uma grande bacia sedimentar com baixas cotas, justifica-se a iniciativa de aplicação da técnica nesta área. Neste sentido, foram realizadas estatísticas em imagens do aerolevanteamento do IBGE de 2005 associadas às imagens do satélite Sentinel-2 de 2017 para quantificação e espacialização dos processos geomorfológicos-fluviais, onde foi possível observar uma significativa mudança na morfologia do canal, aliada à diminuição do espelho d'água. O fluxograma com as etapas de trabalho realizados e fonte dos dados externos utilizados pode ser observado na Figura 1.

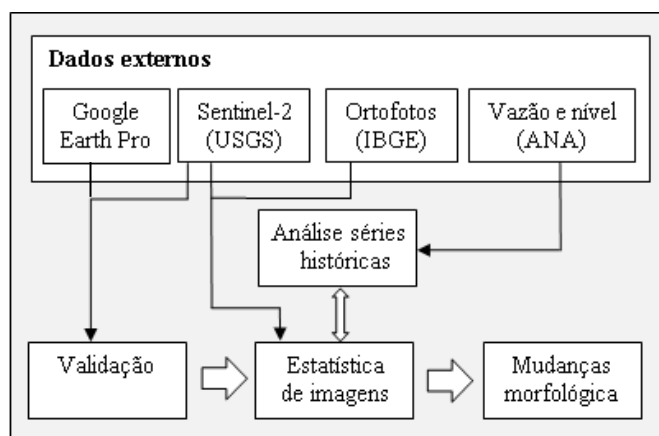


Figura 1 – Fluxograma das etapas realizadas e fontes dos dados utilizados no Artigo 1.

O segundo artigo científico, escrito e, inglês, foi submetido para publicação na revista científica *Atmospheric Research*, ISSN: 0169-8095, website <https://www.journals.elsevier.com/atmospheric-research>. Nele se buscou a realização de testes de sensibilidade às diferentes parametrizações físicas presentes no modelo WRF (*Weather Research and Forecast*), por meio de 49 experimentos (livres associações entre sete esquemas de microfísica e sete esquemas *cumulus*) realizados em toda a extensão da Bacia do Rio Paraíba do Sul. O objetivo foi identificar qual a parametrização física possui melhor desempenho médio na representação dos

eventos de precipitação pluviométrica, sendo utilizada como dados medidos para análise estatística, os valores de precipitação registrados em 19 estações automáticas do INMET, com valores horários, dispersas em toda a extensão da bacia. Foram aplicados testes estatísticos de BIAS, MAE e RMSE para avaliação quantitativa, e métodos de interpolação IDW e Krigagem, para avaliação espacial e construção de isoietas.

O tempo de processamento gasto em cada experimento foi na ordem de 8 horas, considerando um computador com 8GB de memória RAM, processador Intel Core i5 8250U com velocidade de 1,60GHz e oito núcleos de processamento, onde cada experimento corresponde a um período de simulação de 4 dias, com dois domínios aninhados, onde a malha mais grosseira possui 67 x 54 células de ~16,5 km e a malha mais fina 120 x 81 células de ~5,5km. Os resultados apontaram um grupo de quatro combinações de esquemas microfísicos e *cumulus* estatisticamente semelhantes e com melhor desempenho médio. O fluxograma com as etapas de trabalho realizados e fonte dos dados externos utilizados pode ser observado na Figura 2.

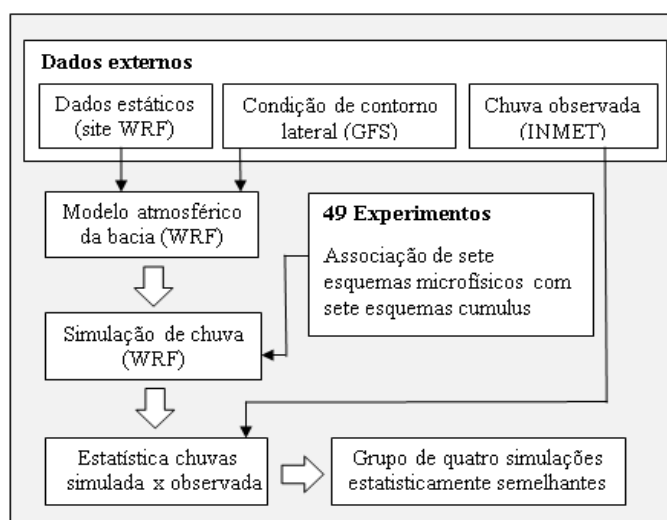


Figura 2 – Fluxograma das etapas realizadas e fontes dos dados utilizados no Artigo 2.

O terceiro artigo científico, que será traduzido para o idioma inglês e posteriormente submetido, construiu um modelo hidrológico da bacia a fim de simular vazão a partir de diferentes entradas de chuva, para o mês de janeiro de 2019. Para este fim foi utilizado o modelo MOHID acrônimo de Modelo Hidrodinâmico, em seu módulo MOHID *Land*, tendo sido este escolhido, em função de uma parceria do IFF com o Instituto Superior Técnico (IST), no Centro de Pesquisa de Tecnologias Marinhas e Ambientais (MARETEC) da Universidade Técnica de Lisboa (UL), Portugal, já consistentemente utilizado em estudos hidrológicos em trabalhos realizados no Programa

de Pós-graduação em Engenharia Ambiental do IFF. O solucionador é de código aberto e livremente distribuído, sendo a sua interface gráfica, o *MOHID Studio*, de propriedade da Bentley® e disponibilizado gratuitamente para o IFF para fins acadêmicos.

A bacia e a rede de drenagem foram geradas a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), adquirida do projeto Topodata/INPE, e foram implementados os métodos *Curve Number*, *Manning*, as seções transversais, os reservatórios e vazão de base, por meio do filtro digital de Chapman. Para a simulação da precipitação foram utilizadas as quatro parametrizações físicas estatisticamente semelhantes, identificadas no modelo atmosférico WRF, descritos no segundo artigo científico, e os valores observados de chuva nas estações do INMET, distribuídas na bacia e interpolados segundo os métodos, IDW e TIN, compondo desta forma seis cenários hidrológicos com variação da entrada de chuva no modelo (quatro oriundos do WRF e dois com chuva interpolada).

Para as simulações com o WRF, o tempo de processamento gasto em cada cenário foi na ordem de 66 horas, considerando um computador com 8GB de memória RAM, processador Intel Core i5 8250U com velocidade de 1,60GHz e oito núcleos de processamento, onde cada cenário correspondeu a um período de simulação de 33 dias (mês de janeiro de 2019 acrescido de dois dias *de spin-up*), com dois domínios aninhados, onde a malha mais grosseira possui 62 x 51 células de 15 km e a malha mais fina 123 x 90 células de 5km. Para as simulações com o *MOHID Land*, o tempo de processamento gasto em cada cenário foi na ordem de 30 minutos, utilizando o mesmo *hardware* e considerando uma malha de 120 x 81 células de ~5,5km.

O ganho proveniente desta ação se concentra na tentativa de obtenção de melhor ajuste para estudos de vazão na medida em que melhores representações de chuva implicam em melhor resposta de vazão na bacia. O fluxograma com as etapas de trabalho realizadas e fonte dos dados externos utilizados pode ser observado na Figura 3.

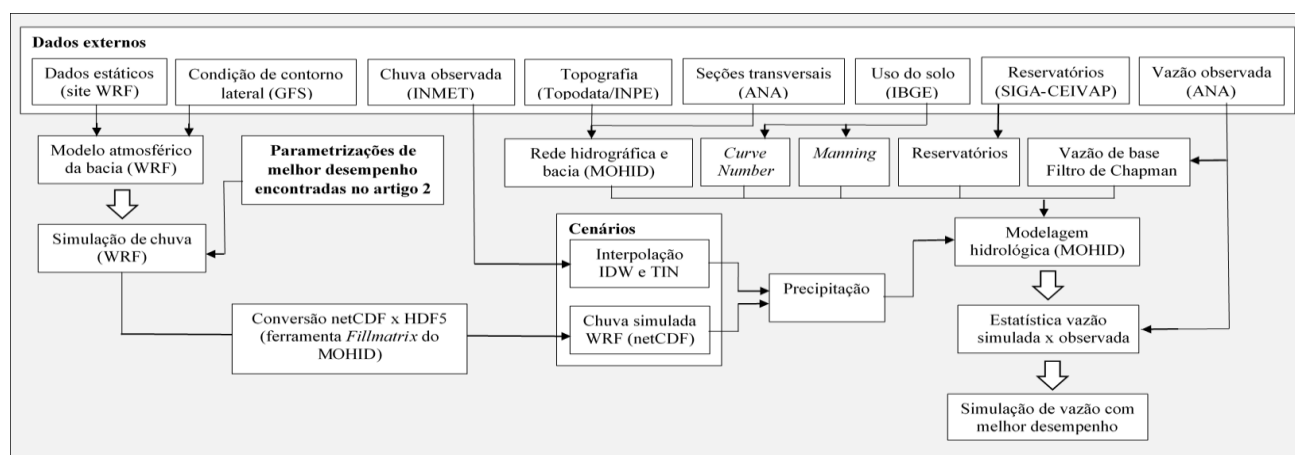


Figura 3 – Fluxograma das etapas realizadas e fontes dos dados utilizados no Artigo 3.

De uma forma mais ampla, esta dissertação visa contribuir para o entendimento dos processos hidrológicos na Bacia do Rio Paraíba do Sul, sobretudo na região do Baixo Paraíba (Região Hidrográfica IX), servindo de subsídio para as políticas públicas de gestão dos recursos hídricos, bem como a difusão da utilização do acoplamento do modelo atmosférico WRF ao modelo hidrológico MOHID *Land*. Espera-se ainda, que sirva de base para a continuidade dos estudos da dinâmica hidrológica da região de interesse, motivando outros pesquisadores acerca desta temática.

ARTIGO CIENTÍFICO 1

GEOTECNOLOGIAS COMO SUPORTE AO DIAGNÓSTICO DA DINÂMICA GEOMORFOLÓGICA-FLUVIAL DO BAIXO CURSO DO RIO PARAÍBA DO SUL¹

GEOTECHNOLOGIES TO SUPPORT THE DIAGNOSIS OF GEOMORPHOLOGICAL AND FLUVIAL DYNAMICS OF THE LOW COURSE OF PARAIBA DO SUL RIVER

Dhiego da Silva Sales - IFFluminense/PPEA

Vicente de Paulo Santos de Oliveira - IFFluminense/PPEA

Jader Lugon Junior - IFFluminense/PPEA

RESUMO

O Paraíba do Sul é um rio brasileiro de grande extensão, que atravessa diversas áreas antropizadas, tendo grande propensão à variação morfológica em seu baixo curso. O presente estudo teve como objetivo verificar a ocorrência de modificações morfológicas nos 65 km finais de seu curso devido às forças geomorfológicas. Foram utilizadas imagens do satélite Sentinel-2, de 2017, associadas ao levantamento aéreo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) realizado na região em 2005. As imagens foram utilizadas para classificar, vetorizar e posteriormente obter a quantificação e espacialização dos processos geomorfológicos fluviais. Para garantir que a variação do nível da água não interferisse na análise, foram observadas as medidas obtidas na estação fluviométrica da Agência Nacional de Águas (ANA) em Campos dos Goytacazes. Portanto, as imagens utilizadas neste trabalho foram escolhidas para corresponder às mesmas medidas de nível no rio. Foi possível perceber que entre 2005 e 2017 houve uma perda significativa na largura média do rio na ordem de 34,75 m (4,53 %) e na área total na ordem de 2,26 km² (4,53 %). Além disso, o satélite Sentinel-2 foi considerado satisfatório para os propósitos da metodologia utilizada neste estudo.

Palavras chave: Geomorfologia fluvial; Assoreamento; Sensoriamento remoto; Monitoramento ambiental; SIG.

¹ Este trabalho foi publicado na revista científica *Mix Sustentável*, ISSN: 2447-0899, (<http://www.nexos.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/issue/view/243>) v. 6, p. 91-103, 2020.

ABSTRACT

The Paraíba do Sul is a Brazilian river of large extension that goes through several anthropic areas. Then, it has a great propensity to the morphological variation in its low course. The present research aimed to verify the occurrence of morphological modifications in the final 65 km of its course due to the geomorphological forces. It was used images from the Sentinel-2 satellite, from 2017, associated to the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE) aerial survey carried out in the region in 2005. The images were used to classify, to vectorize and subsequently to obtain the quantification and spatialization of fluvial geomorphological processes. To ensure the variation of water level did not interfere in the analysis, the measurements obtained from the Brazilian Water Agency (ANA) fluviometric station in Campos dos Goytacazes were observed. So, the images used in this work were chosen to match the same water level measurements. It was possible to realize that between 2005 and 2017 there was a significant loss in the average width of the river in the order of 34,75 m (4,53 %) and in the total area in the order of 2,26 km² (4,53 %). Additionally, Sentinel-2 satellite was considered to be satisfactory for purpose of the methodology used in this study.

Keywords: *Fluvial geomorphology; Silting; Remote sensing; Environmental monitoring; GIS.*

1. INTRODUÇÃO

A sociedade contemporânea, fortemente marcada pela intrincada relação do homem com a natureza, tem ampliado sua preocupação com o uso racional dos recursos naturais notadamente dos recursos hídricos. Nesse contexto, temáticas como uso do solo, erosão, captação de água e assoreamento vem sendo amplamente discutidas.

O assoreamento em particular é um fenômeno que ocorre em rios que sofrem intensos processos erosivos ao longo de seu curso. Ele acontece por meio de causas naturais, como o regime de chuvas e os ventos fortes, que transportam os produtos do intemperismo para os rios que, por conseguinte, irão transportar e depositar estes sedimentos em seus baixos cursos, onde a energia, logo a capacidade de transporte, é reduzida (GUERRA, 2005). Este processo pode ser intensificado pela ação humana, na medida em que as matas ciliares são removidas, favorecendo a dinâmica de erosão dos terraços, o que ocasiona a remoção do solo e rochas para os cursos dos rios (RODRIGUES, 2016).

A ausência de um monitoramento dos processos sedimentológicos, bem como da intensidade dos processos erosivos e deposicionais, no baixo curso do Rio Paraíba do Sul, representa um problema de gestão pública, que afeta o equilíbrio entre homem e natureza.

Entender a evolução do sistema deposicional é de grande importância para o contexto geomorfológico da paisagem, mas também, para outras áreas do conhecimento, envolvendo desde os aspectos físicos, que incluem os estudos hidrológicos e de engenharia, aos aspectos ecológicos, que atentam para a estrutura e funcionamento das comunidades biológicas.

Para o desenvolvimento do presente trabalho foi realizada uma análise quali-quantitativa dos processos geomorfológicos-fluviais do rio, sendo esta análise dividida em dois momentos. Primeiro serão abordados princípios da dinâmica fluvial natural do Rio Paraíba do Sul, buscando entender os processos fluviais naturais e, ainda, serão elencadas a natureza das principais intervenções realizadas neste curso, contribuindo para uma reflexão acerca da diminuição do volume de água. Em seguida pretende-se propor a utilização de geotecnologias, para o monitoramento da dinâmica fluvial, notadamente para a diminuição do espelho d'água e o assoreamento decorrente da perda de capacidade de transporte, uma vez que as imagens de satélites auxiliam na compreensão das complexas relações entre homem e natureza (CARVALHO JÚNIOR, 2018)

Neste sentido, este trabalho visa contribuir para a discussão sobre o uso de ferramentas Sistema de Informação Geográfica (SIG) como suporte ao diagnóstico ambientais e tomada de decisão dos agentes públicos, tais como, dos comitês de bacia, contribuindo para uma gestão integrada e responsável das mais variadas instituições que compõem o mosaico heterogêneo de uso dos recursos hídricos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Caracterização e localização

A bacia do Rio Paraíba do Sul possui área de drenagem de 62.074 km², se estendendo pelo estado de São Paulo (14.510 km²), Rio de Janeiro (26.851 km²) e Minas Gerais (20.713 km²), (CEIVAP, 2019). Uma vez que atravessa três estados, o Rio Paraíba do Sul é domínio federal. Devido a sua grande importância para manutenção de diversos empreendimentos como parques hidrelétricos, atividades mineradoras, indústrias e agropecuária, seus recursos necessitam de monitoramento frequente, visto que seu uso pode ocasionar diversos impactos na sua qualidade e quantidade disponíveis para abastecimento.

O rio nasce na serra da Bocaina, no estado de São Paulo, a 1.800 m de altitude, e deságua no Norte Fluminense, no município de São João da Barra, percorrendo uma extensão de aproximadamente 1.180 km. O seu baixo curso estende-se de São Fidélis/RJ à foz, com 95 km de extensão e declividade média de 0,22 m/km, atravessando a Baixada Campista, extensa planície litorânea (MARENGO e ALVES, 2005).

O trecho escolhido para o estudo se estende desde o limite municipal entre Campos dos Goytacazes e São Fidélis, nas coordenadas $-41,53688^\circ / -21,62133^\circ$, identificado na Figura 1 como o ponto A, até a foz no município de São João da Barra, nas coordenadas $-41,04181^\circ / -21,61933^\circ$, indicado como ponto B. O Rio Paraíba do Sul, no trecho em questão, banha cinco municípios, sendo eles: São Fidélis, Cardoso Moreira, Campos dos Goytacazes, São Francisco do Itabapoana e São João da Barra. A extensão total do trecho delimitado entre os pontos A e B é de 65 km, sendo excluído o trecho final, do delta, para que a dinâmica costeira, provocada pela ação da erosão marinha não comprometesse a análise. A maior parte dessa extensão está localizada dentro dos limites municipais de Campos, correspondendo a aproximadamente 53 km da extensão total.

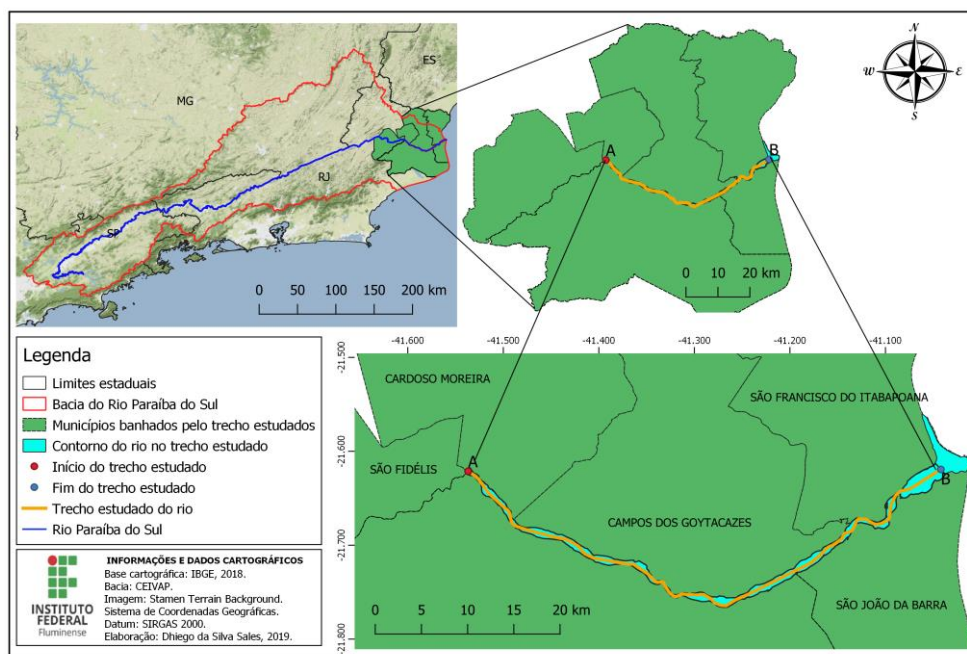


Figura 1 – Delimitação da área de interesse.

Fonte: Elaborado pelos autores.

2.2. Tipologia do canal no trecho de interesse

A heterogeneidade dos canais vem sendo amplamente estudada no campo da geomorfologia fluvial, tendo a nomenclatura destes, crescido de forma não sistemática, embora algumas dessas

classificações têm se apresentando mais frequentemente. As quatro mais usuais são: retilíneo, anastomosado, meândrico e entrelaçado (LEWIN e ASHWORTH, 2014).

O geógrafo brasileiro, Guerra (2005), apresenta três classificações para os canais, sendo eles, canais retilíneos, anastomosados e meandrante. (i) Para os canais retilíneos o autor atribui condições de excepcionalidade na medida em que depende de condições específicas, tais como um embasamento rochoso homogêneo e às vezes associados a linhas tectônicas. O canal retilíneo também pode estar associado a ações antrópicas, que com o objetivo de aumentar o escoamento e promover uma melhor drenagem da região, tem sido muito utilizado em áreas urbanas e de baixada constantemente alagadas. O autor também classifica retilíneo como sendo um seguimento com extensão 10 vezes maior que a largura; (ii) os canais anastomosados são classificados como canais que se caracterizam por apresentar grande volume de carga de fundo que, conjugado com as flutuações de descargas, ocasionam sucessivas ramificações, ou múltiplos canais que se subdividem e se reencontram, separados por ilhas assimétricas e barras arenosas; (iii) os canais meandros estão associados a áreas de baixa declividade onde a energia do fluxo de descarga de água é reduzida, típicos de regiões estuarinas. Apresentam condições de erosão específicas, sendo caracterizados pela zona de deposição na margem convexa (progradação das praias) e em áreas de degradação na superfície côncava.

Além da tipologia acima descrita é recorrente na literatura o canal entrelaçado. Este é definido como sendo rio permeado por ilhas e barras, decorrentes do assoreamento do material transportado em suspensão por suas próprias águas, e é caracterizado por apresentar pouca ou nenhuma mata ciliar no solo ao redor, pois a ausência ou baixo volume de raízes das plantas favorece a erosão, devido à instabilidade do solo exposto, sendo o produto desta erosão carregada para o rio (TEIXEIRA, 2009). Lorang e Hauer (2017), o descreve a partir de um processo que ocorre quando a capacidade do fluxo de transportar sedimentos é excedida pelo volume de sedimento sendo transportado como carga de leito, evidenciando perda da capacidade de transporte de sedimentos. As tipologias descritas podem ser observadas na Figura 2.

Acerca da fisionomia do curso fluvial do Rio Paraíba do Sul no trecho de interesse, o relatório da ENGEORPS (2010) classifica a morfologia, como entrelaçada e com maior sinuosidade do que as regiões a montante (alto e médio curso), logo apresentando uma tendência meândrica associada. Pode-se observar que o rio apresenta diversas ilhas principalmente à jusante do perímetro urbano de Campos dos Goytacazes, corroborando para a classificação entrelaçada do canal. Na área urbana percebem-se os meandros, onde se observa a progradação das praias da margem convexa. Os diques produzidos pela ação antrópica, para o desenvolvimento da cidade, que se encontra nas margens do rio, impedem o processo de escavação da margem côncava dos

meandros, fazendo assim que eles não tendam a aumentar a sinuosidade. Em contrapartida a deposição na margem convexa do meandro, tende a promover um afunilamento do leito do rio.

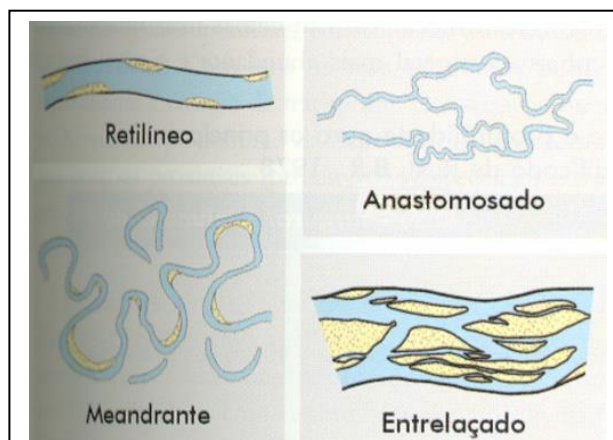


Figura 2 – Principais tipologias dos canais fluviais.
Fonte: Teixeira et al. (2009).

2.3. Uso do solo, processo erosivo e produção de sedimentos

A intervenção humana nas áreas adjacentes aos cursos dos rios, seja na construção de diques ou na remoção de cobertura vegetal nativa, em razão da expansão da atividade agropecuária, ou mesmo para a expansão das cidades, vem contribuindo para o processo de erosão acelerada. A impermeabilização do solo, em função do crescimento das cidades, atua no sentido de dificultar o processo de infiltração, o que acarreta o transporte de sedimentos para os corpos hídricos, que contribuirão para a deposição e conseqüente assoreamento (OLIVEIRA; BEZERRA, 2017).

A remoção da mata ciliar contribui para o processo de erosão que pode ocorrer de duas formas: (i) a erosão laminar, onde o escoamento difuso das águas pluviométricas removem a camada superficial do solo, conduzindo-a para o curso d'água, ou (ii) erosão linear, quando as águas se concentram em linhas de fluxo, resultando em incisões na superfície do terreno, tendendo, neste contexto a ser muito mais agressiva e mudando a geomorfologia fluvial consideravelmente. As águas oriundas das chuvas representam o mais expressivo agente erosivo (MORAIS; SALES, 2017).

A questão dos assoreamentos nos rios está diretamente relacionada aos processos erosivos na medida em que é a erosão que fornece os materiais (sedimentos) que darão origem ao assoreamento. Quando não há energia suficiente para transportar o material erodido, este material é depositado (GUERRA, 2005). A erosão e o assoreamento trazem também como conseqüências uma maior frequência e intensidade de enchentes e alterações ecológicas, na medida em que o acúmulo de

material no fundo do rio diminui o tirante hídrico do curso do rio, deixando-o vulnerável ao transbordamento quando ocorre uma elevação do volume de águas (ABDON, 2014).

Conforme relatório realizado pela COHIDRO (2014), o trecho de estudo representa área de grande potencial de erodibilidade, devido à baixa densidade vegetal nativa, que teria a capacidade de reter os sedimentos, diminuindo a erosão laminar oriunda das precipitações. Os fatores antrópicos desencadeiam um processo de desequilíbrio, sendo estes observados a partir do uso e ocupação do solo, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 – Uso do solo na bacia

Classes	Área (%)
Área Agrícola	9,60
Área não classificada	0,01
Área Urbanizada	5,03
Campos/ Pastagens	39,94
Corpo Hídrico	2,14
Floresta Estacional / Vegetação Arbórea Densa	5,53
Floresta Estacional / Vegetação Arbórea Esparsa	0,58
Floresta Ombrófila / Vegetação Arbórea Densa	11,55
Floresta Ombrófila / Vegetação Arbórea Esparsa	0,85
Florestamento / Reflorestamento	0,28
Restinga/ Mangue	1,07
Vegetação Arbórea Densa	10,62
Vegetação Arbórea Esparsa	12,80

Fonte: Adaptado de CEIVAP (2014)

A partir da análise da Tabela 1 é possível observar a predominância de Campos e Pastagens, na ordem de 40% da área total da bacia. Este tipo de ocupação é caracterizado pelo intenso antropismo e tem a predominância de vegetação herbácea. Este tipo de vegetação é responsável por grandes perdas de solo, intensificando os processos erosivos ao longo da bacia, sendo o produto deste processo carregado pela ação principalmente das chuvas para os rios. Destaca-se ainda a compactação do solo oriundo do pisoteamento do gado, que resulta em uma menor capacidade de infiltração, logo um maior *runoff*.

Somadas as áreas florestadas e de vegetação observa-se a ocupação na ordem de 40%. Os processos erosivos são menos intensos em área com cobertura vegetal preservada, sendo sempre mais intensa em áreas desmatadas, pois a velocidade de escoamento é maior do que em áreas com cobertura vegetal, na medida em que a vegetação além de fornecer um obstáculo ao fluxo de água

favorece a fixação do solo na encosta, além ainda, de permitir que a água infiltre, diminuindo assim a velocidade do fluxo superficial (RODRIGUES, 2016).

As áreas agrícolas formam a terceira grande classe, na ordem de 10%. Esta modalidade de uso do solo representa outra intensa intervenção antropogênica. As diferentes culturas apresentam formas distintas de suscetibilidade à erosão, mas também representa uma intensa modificação da paisagem e intensa produção de sedimentos.

Uma vez que em uma bacia hidrográfica os fluxos de água tendem a se direcionar para o curso principal, e, por conseguinte, para o exutório, todas as atividades a montante deste são importantes para o entendimento da dinâmica hidrológica da bacia como um todo. Neste sentido os dados apresentados indicam uma intensa atividade antrópica, materializada na atividade agropecuária, na ordem de 50% da área total, indicando que a bacia do Paraíba do Sul possui uma forte tendência à produção de sedimentos.

2.4. Geotecnologias, geomorfologia fluvial e modelagem computacional

O monitoramento tanto hidrológico, a partir de medições *in loco*, quanto espacial, por meio de sensoriamento remoto e aerofotogrametria, tem papel relevante no diagnóstico das variações morfológico-fluviais. Neste sentido, o sensoriamento remoto e os sistemas de informações geográficas com fotografias aéreas têm sido usadas para diagnósticos de processos erosivos, uso e ocupação do solo, mapeamento de massas d'água, entre outros.

A atividade de mapeamento de modificações antrópicas em cursos de rios tem sido amplamente utilizada no mundo. Langat et al. (2018) propõem a utilização de fotografias aéreas de alta resolução de 1975 e imagens do satélite Landsat de 2017 para estudo multitemporal da geomorfologia do Rio Tana, no Quênia. Batalla et al. (2017) utilizaram imagens de alta resolução do *Google Earth Pro*, entre 2003 e 2016 para a caracterização do Rio Ñuble no Chile.

No Brasil, o estudo da COPPETEC (2013), que utiliza de modelagem computacional, por meio do modelo SisBaHiA, para realizar diagnóstico e prognóstico da intrusão salina no estuário Rio Paraíba do Sul, utilizou de técnica de SIG, a partir das imagens do *Google Earth Pro*, para a obtenção dos contornos do rio e posterior implementação no modelo. O mesmo trabalho tendo identificado trechos de rio modificados, observa que o levantamento das ilhas tende a enriquecer o modelo e sugere que estes dados sejam implementados em trabalhos futuros, validando assim a iniciativa deste trabalho.

Outras aplicações das geotecnologias em monitoramentos e prognósticos ambientais, diz respeito à estimação de variáveis fisiográficas e hidrológicas em bacias hidrográficas, tais como: altitude, declividade, área e perímetro da bacia, uso e ocupação do solo, construção do modelo digital de elevação, coeficiente de rugosidade (*Manning*), isoietas de precipitação, tipos e textura de solo, densidade de drenagem, seções transversais, delimitação de bacias e construção vetorial da rede de drenagem. Todos estes dados são gerados a partir de ferramental de geoprocessamento e pelo menos um deles (variando do modelo e aplicação) serve como entrada em modelos diversos. Tavares et al. (2019), utilizaram o modelo MOHID *Land* para verificar o desempenho de instalação de um reservatório para controle de cheias na Bacia do Rio Macaé, no Rio de Janeiro, sendo as variáveis de modelo digital de elevação, seções transversais, delimitação da bacia e rede de drenagem, coeficiente de *Manning* e processos de infiltração a partir das cartas de uso e ocupação do solo e tipos de solo, estimadas com ferramental de SIG.

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada no presente trabalho avalia as tendências hidrológicas do Rio Paraíba do Sul e utiliza técnicas de SIG, sendo necessário imagens históricas de alta resolução espacial para a vetorização do curso do rio e ilhas, com a finalidade de identificar a área do espelho d'água que foi decrescida do rio e as mudanças morfológicas no leito, que incluem o aumento do processo de sedimentação e deslocamento das margens. O processo de vetorização leva em consideração a interpretação visual do executante e pressupõe, além do conhecimento sobre o ferramental de geoprocessamento, o conhecimento do local estudado. Por meio dessa vetorização é possível gerar mapas temáticos, extração de dados para operações estatísticas e informações de área do leito do rio preenchida pelo rio e ilhas. Todo o processo de vetorização e estatística foi realizado no *software* QGIS 3.8.0.

3.1. Séries históricas de vazão e nível

A fim de se avaliar quantitativamente as tendências hidrológicas de redução no rio, foram extraídas as séries históricas de vazão e nível, coletadas na estação fluviométrica da Agência Nacional de Águas (ANA), em Campos dos Goytacazes (58974000), a partir do portal *HidroWeb* (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>), entre os anos de 1990 e 2019. Para ambas as curvas foram

estabelecidas uma linha de tendência linear, cujo objetivo é verificar o comportamento das variáveis hidrológicas de nível e vazão ao longo do tempo.

3.2. Determinação das datas de análise e sensor orbital

Para a escolha das cenas e garantia de que a variação do leito não corresponderia à sazonalidade do regime das chuvas (cheia e vazante do rio), foi estabelecido como parâmetro para escolha das cenas, a proximidade das cotas médias do rio nas datas de interesse.

A primeira imagem escolhida é oriunda da campanha de aerolevante realizada pelo IBGE, entre junho e agosto de 2005, disponíveis no site oficial (<https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/arquivos-raster.html>) e que possui uma resolução espacial de 0,7 m, sendo cada foto na escala 1:25.000. A cota média registrada na estação da ANA, citada anteriormente, foi de 609 cm.

A segunda imagem a ser escolhida para comparação necessita ser atual e preferencialmente de alta resolução espacial, para o estabelecimento de uma comparação com maior riqueza de detalhes em relação à primeira imagem. A melhor opção seria uma imagem oriunda de aerofotogrametria, mas devido ao elevado custo associado a uma campanha com aeronave ou drone, esta não se apresenta como uma opção viável. Neste sentido uma opção viável seria o uso de sensores orbitais.

Dentre as opções mais recorrentes na literatura, destacam-se as imagens do *Google Earth Pro*, tal como o trabalho de Batalla et al. (2017), que apesar de alta resolução espacial, inferior a 1m, possuem a limitação de utilização para a grande extensão da área de estudo – 65 km – pois são utilizadas imagens de diferentes datas para compor o mosaico da região, o que inviabiliza a sua utilização para a metodologia imposta nesse trabalho, que necessita de padronização de cota no ponto de controle. Outra limitação diz respeito à possibilidade de substituição das imagens do banco de dados do *Google* sem aviso prévio, o que impossibilita a reprodução do estudo a qualquer tempo.

A utilização de satélites se configura como a melhor opção para atendimento à metodologia apresentada, pois minimiza a problemática de se obter uma imagem com a mesma cota da primeira imagem, devido à frequência de revisita mensal, que varia conforme o satélite. Outro ponto positivo dessa técnica se refere à área de cobertura de uma única cena ser de algumas dezenas de quilômetros, o que torna um estudo de geomorfologia fluvial viável, pois grandes extensões do rio estão inseridas na mesma cena, ou seja, a cena representa o rio sob as mesmas condições. Um ponto negativo associado a esta técnica se refere ao fato que em condições atmosféricas adversas, tais como a presença de nebulosidade ou chuvas, a imagem não é aproveitada, pois não é possível alcançar os alvos na superfície (LIU, 2006).

Foram buscados os satélites disponíveis com imagens gratuitas e de alta resolução espacial, para uma equiparação com a imagem de alta resolução do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Uma opção amplamente difundida na literatura é o Landsat-8, tal como utilizado no trabalho de Langat et al. (2018). Este é um satélite bastante versátil e gratuito, o que o torna amplamente difundido para uma grande variedade de estudos. Possui uma resolução temporal de 16 dias e uma resolução espacial de 30 m, não sendo a melhor opção para quantificação de variações morfológicas devido ao erro associado à resolução espacial (cada pixel deste satélite possui 900 m²).

Devido à resolução espacial, optou-se neste trabalho pelo uso do satélite Sentinel-2, cujas imagens são disponibilizadas de forma gratuitas no site *Earth Explorer* do Serviço Geológico Americano (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

A missão Sentinel-2, vinculado ao programa Copernicus, desenvolvido pela Agência Espacial Européia (ESA), é composta de dois satélites (2A e 2B) defasados 180° na mesma órbita, o que permite uma revisita de 5 dias no equador. O satélite 2A foi lançado pela Comunidade Europeia e pela ESA, em junho de 2015 e 2B em março de 2017, estando os dois em operação. Este satélite é do tipo multiespectral e possui 13 bandas, as quais dispõem a seguinte distribuição de resoluções espaciais: quatro bandas de 10 m, seis bandas de 20 m e três bandas de 60 m, como descreve a Tabela 2 (ESA, 2015).

Tabela 2 – Resolução espacial e espectral das 13 bandas.

Bandas	Comprimento de onda central [μm]	Resolução [m]
B01 - Aerossol	0,443	60
B02 - Azul	0,490	10
B03 - Verde	0,560	10
B04 - Vermelho	0,665	10
B05 - Red Edge	0,705	20
B06 - Red Edge	0,740	20
B07 - Red Edge	0,783	20
B08 - NIR (Infravermelho próximo)	0,842	10
B08A - Red Edge	0,865	20
B09 - Vapor de água	0,945	60
B10 - Cirrus	1,375	60
B11 - SWIR	1,610	20
B12 - SWIR	2,190	20

Fonte: Adaptado de ESA (2015).

A data da imagem escolhida do satélite foi de 26/01/2017, que possuía uma cota média de 602 cm no dia da passagem do satélite, no ponto de controle. Esta data foi escolhida tendo em vista

necessidade de se manter o nível médio do rio próximo ao nível da campanha do IBGE que foi de 609 cm.

3.3. Processamento das imagens orbitais

As imagens do Sentinel-2 são disponibilizadas como produto *Top-Of-Atmosphere* (TOA) no nível 1C (L1C) com correção radiométrica e geométrica no sistema de projeção UTM/WGS84 (ESA, 2015). Foi aplicada a correção atmosférica DOS1, *Dark Object Subtraction*, cuja finalidade é a redução da influência da atmosfera na qualidade da imagem. Para etapa de pré-processamento, foi utilizado o *plugin* do SCP, *Semi-Automatic Classification*, disponível no catálogo de complementos do QGIS.

A fim de se realizar a vetorização do leito do rio foi utilizada a técnica de classificação supervisionada, que consiste no agrupamento de pixels com assinaturas espectrais semelhantes, para identificação dos pixels que correspondem ao espelho d'água e ao contorno das ilhas. Para classificação este trabalho optou pela banda 8, infravermelho próximo. A escolha dessa banda se deu em função do comportamento do infravermelho na água tendendo a absorção, logo, uma menor reflexão na faixa do 0,842 μm . Este comportamento é ilustrado na Figura 3.

Antes da escolha, foi realizado um experimento de utilização do índice NDWI (*Normalized Difference Water Index*), que foi concebido com a finalidade de delinear ambientes de águas abertas, automatizando a determinação do limiar entre água e terra (vegetação terrestre e solos) (BRENNER e GUASSELLI, 2015) e pode ser obtido por meio de operações entre as bandas espectrais do verde e infravermelho próximo, conforme Mcfeeters (1996):

$$\text{NDWI} = (\text{GREEN} - \text{NIR}) / (\text{GREEN} + \text{NIR}) \quad (1)$$

O NDWI vem amplamente sendo utilizado em trabalhos de mapeamento de corpos hídricos (CARVALHO JÚNIOR (2018); MARTH, MOURA, KOESTER (2016); BRENNER, GUASSELLI (2015)), no entanto, neste trabalho, o resultado do infravermelho próximo se mostrou mais adequado para o monitoramento de pequenas variações morfológicas. Na Figura 4, pode-se observar que a resposta do NDWI apresenta pequenas variações na margem e no contorno das ilhas, ocasionando em erro de interpretação no sentido de diminuição do espelho d'água, talvez pelo fato da grande presença de material particulado e da pequena lâmina d'água associada nas margens do rio e ilhas. Uma vez que o infravermelho próximo é absorvido pela água, a resposta visual tende a ser bem mais coerente com a realidade, apresentando uma resposta satisfatória em pequenas profundidades e com

intensa presença de material particulado. Segundo Meneses et al. (2012), a reflectância média da água é muito próxima na região do visível e é facilmente discriminada na imagem do infravermelho próximo de um sensor multiespectral. Ainda se destaca a interpretação visual do operador como sendo de vital importância ao êxito da análise.

Adicionalmente à análise acima descrita, foi observada a composição colorida fornecida pelo *software Google Earth Pro*, na data de interesse, de forma a corroborar com a escolha do infravermelho próximo. A interpretação visual da composição colorida associada à cena do satélite apresentou maior semelhança de contorno do infravermelho próximo que o NDWI.

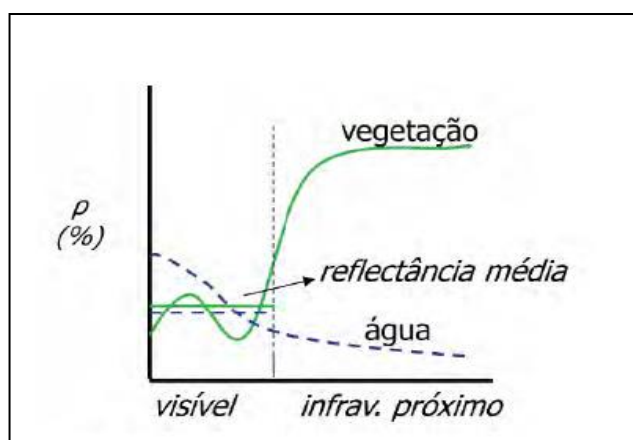


Figura 3 – Assinatura espectral da água e vegetação.
Fonte: Meneses et. al. (2012).

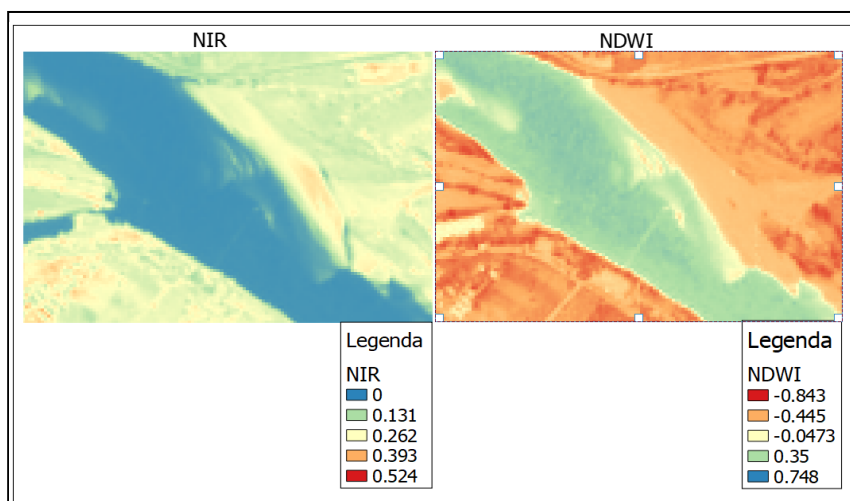


Figura 4 – Comparação NIR x NDWI.
Fonte: elaborado pelos autores.

3.4. Validação: Comparação Google Earth x Sentinel-2

A fim de validar o uso do satélite Sentinel-2, foram buscadas no *software Google Earth Pro* imagens de alta resolução que dispusessem da mesma cota do rio em uma data próxima do satélite.

Neste sentido, foi utilizada uma imagem do *Google Earth Pro* de 11/08/2016 (acessada em 02/12/2018) com uma cota do rio em 468 cm. Foi vetorizado no *software* de geoprocessamento QGIS um trecho de 8,3 km do rio, que corresponde a 12,7 % do curso total de interesse, constituindo assim um trecho de controle para validação.

A cena do Sentinel-2 escolhida para a comparação foi de 29/08/2016, sendo a cota do rio encontrada nesta data de 468 cm (mesmo valor da imagem do *Google* de 11/08/2016). A banda escolhida para vetorização do leito do rio foi a 8, com resolução espacial de 10 m e que corresponde ao infravermelho próximo – NIR (*Near-infrared*), de comprimento de onda central de 0,842 μm .

Após a classificação foi realizada a vetorização da imagem, no mesmo trecho, referente à imagem do *Google Earth Pro* utilizada, sendo obtidos os valores conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Validação da imagem do Sentinel-2 a partir da imagem do *Google Earth Pro*

Fonte da imagem	Data	Nível (cm)	Área vetorizada (km ²)
<i>Google Earth Pro</i>	11/08/2016	468	3,433
Sentinel-2	29/08/2016	468	3,491
Diferença			1,69%

Fonte: elaborado pelos autores.

Foi possível observar que a vetorização da imagem do *Google Earth Pro* apresentou uma área de 3,433 km², enquanto à imagem do Sentinel-2, apresentou uma área de 3,491 km² resultando em uma diferença de 1,69%. A sobreposição dos contornos das duas imagens associadas à baixa diferença descrita resultou na validação da imagem do satélite Sentinel-2 para a metodologia proposta.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Tendências hidrológicas

O perfil altimétrico da região de Campos dos Goytacazes é plano, sendo de origem geológica recente. O volume de água ocupado regularmente no Rio Paraíba do Sul, tem decrescido ao longo do

tempo, fruto principalmente, das diversas obras de intervenção antrópica a montante. Conforme Marengo e Alves (2005),

(...) a bacia do Rio Paraíba do Sul tem sido palco para a implantação de uma série de aproveitamentos de usos múltiplos da água (...) dentre as possíveis causas desta redução sistemática nas vazões e cotas do Paraíba do Sul, temos: (a) efeitos antropogênicos de uso da água para abastecimento e geração de energia, com a construção de barragens e açudes; (b) desvio de rios para usos na agricultura e que pode aumentar a evaporação; (c) mudanças no uso da terra que pode afetar todo o ciclo hidrológico; (d) mudanças gradativas no canal do rio devido à sedimentação e deposição de sedimentos que podem não ter sido consideradas no momento de calcular vazões usando a curva chave; e, finalmente, (e) mudanças gradativas no regime e distribuição de chuvas na bacia, decorrentes de mudanças climáticas regionais (MARENGO e ALVES, 2005, p3-4)

Os autores apresentam as diversas possibilidades de alterações na bacia, que irão implicar na diminuição no fluxo de água. Há de se notar que a maior parte das razões diz respeito a ações antropogênicas, sendo a gestão integrada das bacias hidrográficas uma ação que vai além dos limites municipais ou divisas estaduais.

As Figuras 5 e 6 representam as curvas de nível e vazão e suas respectivas linhas de tendência linear. Em ambos os casos foram identificadas tendências de redução, notadamente a partir de 2012.

Corroborando com esta ideia, o estudo de Barroso et al. (2019) descreve a influência direta da vazão no processo de salinização da foz, estabelecendo um vínculo entre a intrusão salina e a diminuição da vazão no rio. Os autores apresentam que o fluxo sustentável de vazão na foz do Rio Paraíba do Sul, para manter uma condição de equilíbrio seria de 567,45 m³/s. Ao se observar as tendências de vazão (Figura 3), especialmente a partir de 2012, é possível observar que as vazões se encontram na média sempre abaixo do limiar de 500 m³/s, e os picos superiores a este limiar são referentes à sazonalidade dos regimes pluviométricos, que no clima tropical, estão no período de verão (período de cheia).

Os pontos mais elevados, em ambos os gráficos, representam a sazonalidade do regime de chuvas na extensa bacia do Rio Paraíba do Sul, entretanto as maiores concentrações de pontos indicam uma tendência de queda, tal como, evidencia a linha de tendência linear.

A partir desses dados, é possível observar uma forte tendência à diminuição do volume de água no rio, implicando na possibilidade de levar o curso à exaustão se não forem buscadas alternativas para as sucessivas intervenções no rio.

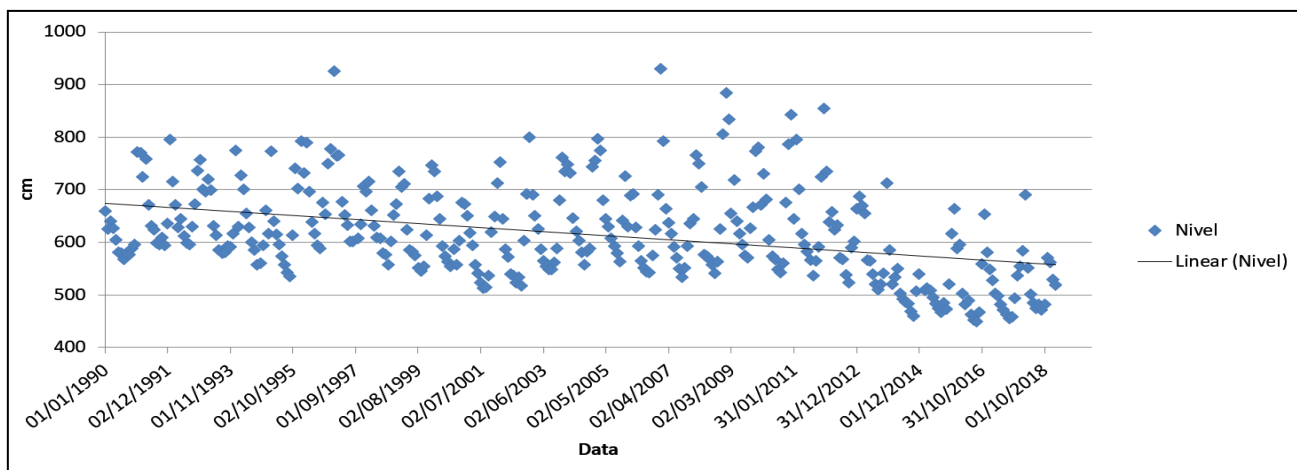


Figura 5 – Evolução do decréscimo dos valores de nível do Rio Paraíba do Sul, coletados na estação fluviométrica da ANA, em Campos dos Goytacazes, entre 1990 e 2019.

Fonte: Elaborado pelos autores

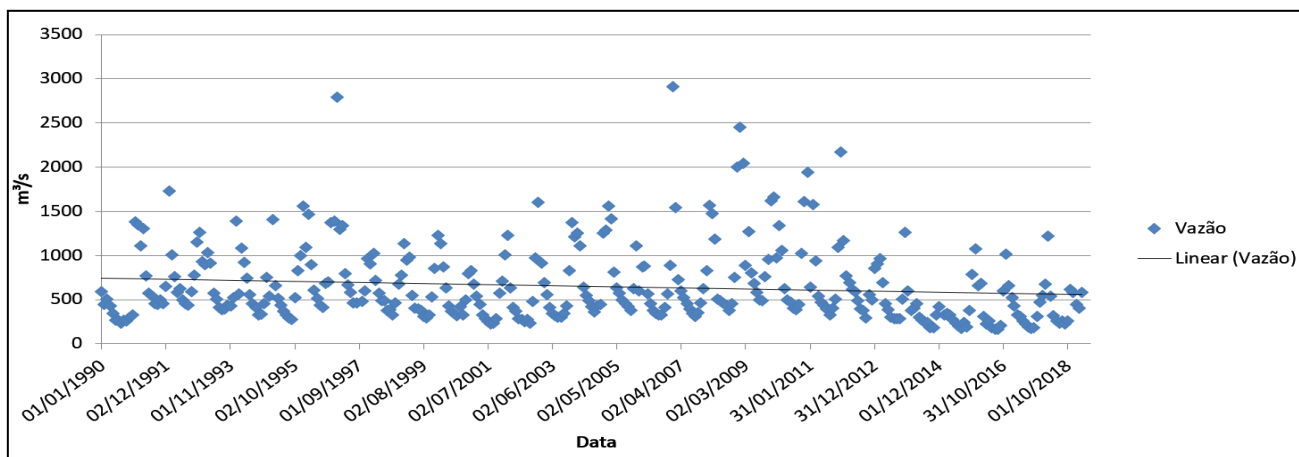


Figura 6 – Evolução do decréscimo dos valores de vazão do Rio Paraíba do Sul, coletados na estação fluviométrica da ANA, em Campos dos Goytacazes, entre 1990 e 2019.

Fonte: Elaborado pelos autores

4.2 Variações morfológicas ocorridas entre junho de 2005 e janeiro de 2017

Após validação da imagem do Sentinel-2 para observação de pequenas variações na geomorfologia fluvial, foi realizada a vetorização de todo o trecho de 65 km, representada na Figura 1, tanto a partir da imagem do aerolevanteamento do IBGE, quanto do Sentinel-2.

As datas e cotas médias são expressas na Tabela 4.

Tabela 4 – Condições de cota no período de análise

Fonte da imagem	Data	Nível (cm)
Aerolevanteamento do IBGE (inverno)	Jun a ago/2005	609
Sentinel-2 (verão)	26/01/2016	602

Fonte: elaborado pelos autores.

A tentativa de se obter a mesma cota média evidenciou a diminuição do volume do rio. A Tabela 4 mostra que a obtenção de cotas semelhantes se deu em épocas diferentes do ano, onde o inverno (aerolevanteamento do IBGE) representa o período de vazante do rio devido à baixa pluviosidade (período seco) e o verão (imagem do Sentinel-2) representa o período de cheia devido à alta pluviosidade. Uma vez que a equiparação das cotas se deu em estações do ano diferentes e as curvas históricas mostram a mesma tendência, é possível inferir uma diminuição do volume total do rio.

A perda de volume do rio está associada à perda da capacidade de transporte, que além dos processos estuarinos de intrusão salina, também representam um problema de gestão de recursos hídricos associados à disponibilidade hídrica ao longo de seu curso, bem como aos processos sedimentológicos.

A vetorização do leito do rio e a sobreposição dos contornos nos permitem observar consideráveis variações geomorfológicas no curso do rio, conforme evidencia a Figura 7.

Estas variações refletem espacialmente as modificações que ocorreram e continuam ocorrendo na morfologia do Rio Paraíba do Sul, ao longo dos últimos 12 anos. É possível, por meio de ferramentas de geoprocessamento, realizar a quantificação dessas mudanças, sendo estas expressas conforme a Tabela 5.

No que se refere à largura média no trecho estudado, a Tabela 5 apresenta uma perda de 34,75m ou 4,53%, facilmente observada na espacialização das variações morfológicas expressas na Figura 7, onde é possível notar que o contorno indicado como sendo do ano de 2017 se encontra quase sempre inserido no contorno referente ao ano de 2005. Esse afunilamento demonstra espacialmente essa perda de largura média no rio.

A partir desse afunilamento é possível observar que o rio está gradativamente perdendo área, sendo quantificado neste estudo o valor de 2,26 km², expresso na Tabela 5, que representou a área de espelho d'água que foi decrescida em 2017, quando comparada com 2005.

Outro dado de relevância diz respeito ao processo de incorporação de ilhas às margens do rio. Este comportamento pode ser observado no ponto B da Figura 7, que representa uma ilha que existia em 2005, mas que foi incorporada a margem devido à redução do volume de água, possivelmente ocasionada pela ação antrópica no sentido de intensificação do uso da água. O valor de 2 km²,

expresso na Tabela 5, referente a perda de área das ilhas, são ocasionadas pelas incorporações destas a margem.

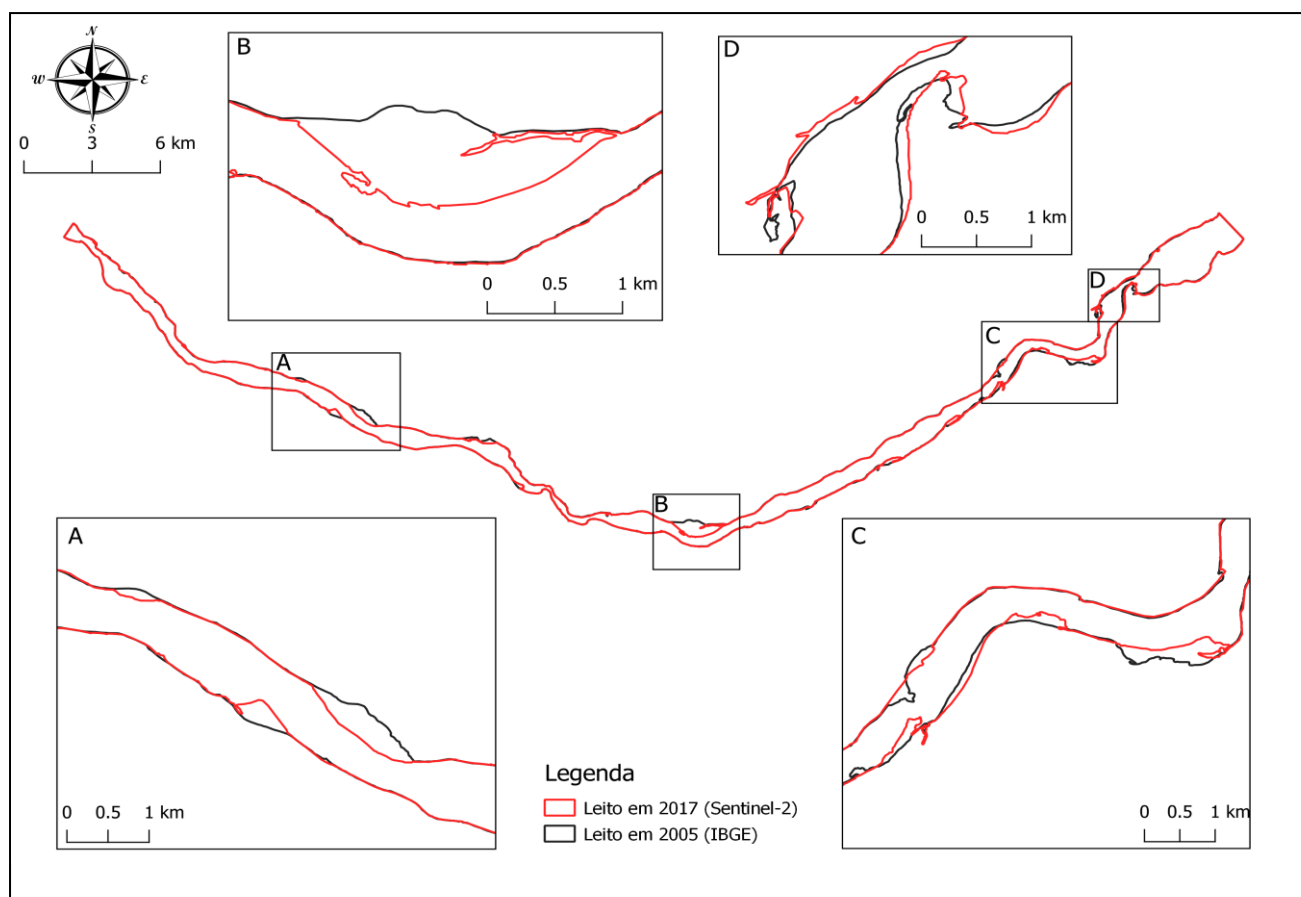


Figura 7 – Variações morfológicas no trecho de interesse entre os anos de 2005 e 2017.

Fonte: elaborado pelos autores.

Tabela 5 – Estatísticas das variações morfológicas no trecho de interesse entre os anos de 2005 e 2017.

Variações morfológicas	Jun a Ago/2005	26/01/2017	2017/2005 (Absoluto)	2017/2005 (%)
Área total das ilhas (km ²)	16,30	14,30	-2,00	-12,27%
Área total do leito do rio (km ²)	49,92	47,66	-2,26	-4,53%
Largura média (m)	766,84	732,09	-34,75	-4,53%

Fonte: elaborado pelos autores.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho evidenciou significativas mudanças na geomorfologia fluvial do baixo curso do Rio Paraíba do Sul, onde foi possível perceber, que entre os anos de 2005 e 2017, houve perda significativa na largura média do rio na ordem de 34,75 m (4,53 %) e na área total na ordem de 2,26 km² (4,53 %). Estes dados são de relevância e contribuem para o diagnóstico dos processos geomorfológicos do rio Paraíba do Sul. Recomenda-se para trabalhos futuros o comparativo com outros métodos para confrontação desses valores, uma vez que não há dados para comparação disponível na literatura.

A utilização das imagens do satélite Sentinel-2, mostrou-se eficaz no processo de monitoramento e quantificação da dinâmica geomorfológico-fluvial do Rio Paraíba do Sul, configurando-se como uma ferramenta de baixo custo para subsidiar ações de gestão dos comitês de bacias hidrográficas. Foi possível espacializar e quantificar as modificações na geomorfologia fluvial, onde ilhas vêm sendo incorporadas às margens, o leito principal está perdendo largura e as ilhas restantes estão aumentando de extensão ao longo de seu curso.

Do ponto de vista hidrológico, este trabalho fez uma breve discussão sobre a diminuição das vazões, e, por conseguinte, da capacidade de transporte do rio a partir da série histórica (1990 – 2019) medidos na estação fluviométrica da ANA, no município de Campos dos Goytacazes. Trabalhos prévios no rio como o de Marengo e Alves (2005) e Barroso et al. (2019) identificaram essa tendência de queda na vazão, onde o segundo associou a intrusão salina, temática estratégica para o comitê de bacia, a diminuição da vazão no rio.

No que se refere ao nível e vazão nas séries históricas (1990 – 2019) observa-se uma tendência significativa de redução a partir de 2012, indicando uma perda de volume no rio. Um estudo mais detalhado de caráter de disponibilidade hídrica, transposição, captações, associado às tendências de precipitação na bacia poderá indicar as causas.

Especificamente sobre o processo de sedimentação, a metodologia utilizada nesta pesquisa não se mostrou conclusiva, deixando para um próximo trabalho a iniciativa de quantificação dos processos sedimentológicos. Não há, a princípio, evidências conclusivas de que a progradação da margem convexa dos meandros e o alongamento das ilhas sejam oriundos diretamente de um processo de assoreamento crescente ou se apenas ocorreu uma redução do espelho d'água devido ao aumento da captação a montante.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDON, M. M. Os impactos ambientais no meio físico, erosão e assoreamento na bacia hidrográfica do Rio Taquari, MS. 2014. 319p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos: USP.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos, Portal HidroWeb. Disponível em: < <http://www.snirh.gov.br/hidroweb>> Acesso em: 5 de dezembro de 2018.

BARROSO, G. L.; SILVA, L B. C.; OLIVEIRA, V, P. S. Analysis of the correlation between salinity and environmental variables in the estuary of the Paraíba do Sul river – Brazil. In RODRIGUES, T. A.; LENDRO NETO, J.; GALVÃO, D. O. (org). As ciências do mar em todos os seus aspectos. 1ed. Ponta Grossa: Atena Editora, 2019, p. 103-117.

BATALLA, R. J; IROUMÉ, A; HERÁNDEZ, M; LLENA, M.; MAZZORANA, B; VERICAT, D. Recent geomorphological evolution of a natural river channel in a Mediterranean Chilean basin. *Geomorphology*, v. 303, p. 322-337, 2018.

BRENNER, V. C.; GUASSELLI, Laurindo Antônio. Índice de diferença normalizada da água (NDWI) para identificação de meandros ativos no leito do canal do rio Gravataí/RS–Brasil. In: ANAIS XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO-SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, v. 25, 2015.

CARVALHO JÚNIOR, O. A. Aplicações e perspectivas do sensoriamento remoto para o mapeamento de áreas inundáveis. *Revista de Geografia (Recife)*, v. 35, n. 4, 2018.

COHIDRO. Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e planos de ação de recursos hídricos das bacias afluentes, r3-b: relatório de diagnóstico. CEIVAP, Rio de Janeiro, 226 p, 2014.

COMITÊ PARA INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL (CEIVAP). Dados geoambientais, 2019. Disponível em: <www.ceivap.org.br/dados-gerais.php>. Acesso em: 26 de junho de 2019.

COPPETEC (Fundação COPPETEC, Laboratório de Hidrologia). Plano estadual de recursos hídricos do estado do Rio de Janeiro, r3-b: temas técnicos estratégicos, rt-07 – estudos de avaliação de

intrusão salina. Governo do Estado do Rio de Janeiro/Secretaria de Estado do Ambiente/INEA, Rio de Janeiro, 75 p, 2013.

ENGECORPS. Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio Paraíba do Sul, R 02 – Coleta de Dados Engecorps - Brasília: ANA, SUM, 2010. 285p.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). Sentinel-2 User Handbook. 2015. 64p. Disponível em: <https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook>. Acesso em: 21 de dezembro de 2018.

GUERRA, A. J. T. (org). Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. 6.ed. Bertrand Brasil: 2005. 472p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Ortofotos da Bacia do Rio Paraíba do Sul. Disponível em: <<https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/arquivos-raster.html>> Acesso em: 23 de setembro de 2018.

LANGAT, P. K.; KUMAR, L.; KOECH, R. Monitoring river channel dynamics using remote sensing and GIS techniques. *Geomorphology*, v. 325, p. 92-102, 2019.

LEWIN, J., and ASHWORTH, P. J. Defining large river channel patterns: Alluvial exchange and plurality. 2014. *Geomorphology*, 215, 83–98.

LIU, W. T. H. Aplicações de sensoriamento remoto. Campo Grande: Ed. UNIDERP, 2006. 908p.

LORANG, M. S.; HAUER, F. R. Fluvial geomorphological processes. In: *Methods in Stream Ecology*, Volume 1 (Third Edition). 2017. p. 89-107.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Tendências hidrológicas da bacia do rio Paraíba do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 20, n. 2, p. 215-226, 2005.

MARTH, J. D.; MOURA, N. S. V.; KOESTER, E. Localização e mapeamento de áreas úmidas na Sub-bacia hidrográfica Arroio Santa Isabel, através do método NDWI. *Geografia (Londrina)*, v. 25, n. 1, p. 23-41, 2016.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. v. 11, 2012. Brasília, DF: Universidade de Brasília– CNPq.

MCFEETERS, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432.

MORAIS, R. C. S.; SALES, M. C. L. Estimativa do Potencial Natural de Erosão dos Solos da Bacia Hidrográfica do Alto Gurguéia, Piauí-Brasil, com uso de Sistema de Informação Geográfica. Caderno de Geografia, v. 27, n. 1, p. 84-105, 2017.

OLIVEIRA, T. C. E.; BEZERRA, M. C. L. Manejo Sustentável da Água no Meio Urbano: O Caso de Brasília. In: Anais [do] ENSUS 2017 - V Encontro de Sustentabilidade em Projeto. Florianópolis: UFSC/VIRTUHAB, 2017. v. 1. p. 1-1702

RODRIGUES, J. P. S. Avaliação da qualidade ambiental urbana na bacia hidrográfica do Córrego das Lajes em Uberaba (MG). 2016. 127p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geografia: UFG.

TAVARES, L. P. S.; LUGON JÚNIOR, J.; RODRIGUES, P. P. W.; KALAS, F. A.; WASSERMAN, J. C. Reservoir Implantation for Flood Dampening in the Macaé River Basin Using the MOHID Land Model. CIÊNCIA E NATURA, v. 41, p. 1-10, 2019.

TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M. C. M.; TAIOLI, F. Decifrando a Terra. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009, 557p.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS. Earth Explorer, Sentinel-2. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>> Acesso em: 30 de novembro de 2018.

ARTIGO CIENTÍFICO 2**QUANTITATIVE EVALUATION OF ATMOSPHERIC PHENOMENA MODELS FOR
PRECIPITATION ASSESSMENT IN THE PARAÍBA DO SUL WATERSHED²**

Dhiego da Silva Sales - IFFluminense/PPEA

Vicente de Paulo Santos de Oliveira - IFFluminense/PPEA

Nivaldo Silveira Ferreira – UENF/LAMET

Antônio José da Silva Neto - Instituto Politécnico (IPRJ)

Jader Lugon Junior - IFFluminense/PPEA

ABSTRACT

This paper is aimed at performing a group of experiments to evaluate the sensitivity to cumulus and microphysics schemes, as represented in numerical simulations of the Weather Research and Forecasting (WRF) model. Seven microphysics schemes were tested in association with seven convective schemes in order to identify the combination which best represents the rainfall distribution in the Paraíba do Sul watershed. The schemes of planetary boundary layer, surface layer, longwave radiation and shortwave radiation were set from four experiments configured with physical parameterizations already used in the same region, and available in the literature. The Global Forecast System model (GFS) was used as a lateral boundary condition data for the downscaling procedure, and the horizontal resolution used was 0.05° (~5.5km) in the fine grid. The experiments were performed for the time period between January 2nd and 6th, 2019, since it was the period of greatest instability, registered by the 19 automatic stations of Brazilian National Institute of Meteorology (INMET), distributed in the watershed for the 2018/2019 summer. In order to evaluate the best performance experiments, they were submitted to statistical tests of bias (BIAS), root mean square error (RMSE) and absolute mean error (MAE).

Keywords: Atmospheric modeling. Rainfall simulation. Geotechnologies. Convective and microphysical parameterization.

² Artigo submetido para a revista *Atmospheric Research*, ISSN: 0169-8095.

1. INTRODUCTION

Currently atmospheric models are executed from a sophisticated set of physical parameterizations which considers atmospheric physics processes in an increasingly detailed way (LIU et al., 2018). Physical parametrization schemes are simplified formulations rather than complex theoretical models for solving the terms associated with turbulent momentum, heat and humidity flux. They are important components of numerical models, performing an important role in determining model behavior (GUNWANI; MOHAN, 2017).

Weather Research and Forecasting model (WRF) coupled schemes are: the microphysics, the longwave radiation, the shortwave radiation, cumulus, the planetary boundary layer (PBL), the surface layer, and the surface model of the earth. Microphysics includes explicit processes of water vapor, cloud and precipitation. Radiation schemes deal with atmospheric heating due to the absorption, emission, and scattering phenomena and longwave and shortwave surface radiation for the calculation of ground temperature. The cumulus scheme is responsible for sub-grid effects, convection, and vertical distribution of moisture and heat. Surface layer schemes calculate friction velocities and exchange coefficients. Land surface schemes provide heat and moisture flows over land and sea-ice points. Planetary boundary layer schemes are responsible for turbulent mixing across the entire network column (SKAMAROCK et al., 2019).

Due to this large number of parameters to be inserted in the model, it is a recurring activity in the literature to resort to sensitivity tests in order to identify a set of schemes which efficiently respond to the meteorological and spatial variables for each case and region, being these tests empirically proposed, or even by trial and error (DI et al., 2015). The goal of this type of study is to use different combinations of parameters in order to understand how the variations in schemes associations affect the simulation of specific processes.

Mohan et al. (2018) used the WRF model to simulate a heavy rainfall event in southeast India and studied the sensitivity to microphysics parametrization. Avolio and Stefano (2018) simulated a heavy rainfall event in southern Italy using WRF and performed sensitivity tests with twelve different parametrizations and verified 156 rain gauges over the area of interest. Yang et al. (2019) performed a sensitivity analysis of raindrop size distribution parametrizations in WRF with three different microphysics parameterizations and obtained better accuracy using data for approximately 100 rainfall simulation events in Chilbolton, UK (United Kingdom).

The combination of all schemes inserted in WRF generate, in version 3.3, a total number of 10,818,800 different parametrization possibilities, as shown by the study of Mesquita (2012), highlighting the obstacle associated with the task of defining a parameterization that represents a

precisely local atmospheric phenomenon. The WRF model version used in the present work (version 4) relies on the implementation of new schemes, which increases the number of combinations in relation to the previous study mentioned above.

Even though the precipitation is originated from the interaction of all the schemes that composes the physical parameterization, Liu et al. (2018) consider the convection and microphysical parameterization schemes the two most important components related to precipitation and cloud simulations in atmospheric models. The total precipitation is a sum of convective (cumulus) and non-convective (microphysical) rainfall (WANG et al., 2019). Using this concept, in this study with focus on the Paraíba do Sul watershed region are considered planetary boundary layer (PBL), surface layer, land surface, longwave radiation and shortwave radiation schemes, which have been defined based on tests performed with the parameters described in the studies of Bender (2012), Silva et al. (2016), Silva et al. (2017) and Souza et al. (2017), in which was used the (WRF-ARW).

Silva et al. (2017) examined the characterization of atmospheric thermodynamic conditions and investigated the triggering dynamics of rain events on two specific days, November 29th and December 12th, 2016, in which heavy rainfall forecasts were registered for the Rio de Janeiro Metropolitan Region. Bender (2012) assessed the ability of the WRF-ARW model to effectively perform weather forecasting in São Paulo by evaluating temperature and precipitation parameters from April 2010 to March 2011. Silva et al. (2016) sought to evaluate the performance of atmospheric indicators in rainfall events that occurred in the city of Rio de Janeiro, in the period 1997-2012, with the objective of identifying which of them presented greater reliability in identifying favorable atmospheric conditions, as well as the occurrence of severe rainfall. The study of Souza et al. (2017) seeks to associate the influence of urban heat islands in the convective processes of rain formation, able to modify the rainfall regime of the metropolitan region of São Paulo on January 24th, 2014, November 26th, 2014 and December 22th, 2014.

The present study was carried out in the Paraíba do Sul River watershed in Brazil, which has an area of approximately 62,074 km² extending over the states of São Paulo (14,510 km²), Rio de Janeiro (26,851 km²) and Minas Gerais (20,713 km²). This watershed encompasses 184 municipalities, of which 88 in Minas Gerais, 57 in the state of Rio de Janeiro and 39 in the state of São Paulo (CEIVAP, 2019). Since rainfall is mostly recorded from stations located in the urban areas of major population agglomerations, it is justified to create computational models for precipitation effects evaluation along the watershed.

For the microphysics and convection schemes, in this work 49 experiments are performed with all possible combinations of the Kessler, Lin, WSM3, WSM5, WSM6, Eta (Ferrier) and Goddard microphysics schemes, together with Kain-Fritsch, Betts-Miller-Janjic, Grell-Devenyi,

Grell-Freitas, Grell3D, Tiedtke and New Tiedtke convective schemes, in order to determine the best average performance combination across the watershed. In order to evaluate the performance of each experiment, statistical measures of bias, mean absolute error and root mean square error were used to compare the results obtained with the measurements available, and finally to point out a small group that is closer to it.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. WRF model description

The WRF is a flexible public domain model that can be used with spatial resolutions from tens of meters to thousands of kilometers, composed of two dynamic solvers the NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model) and ARW (Advanced Research WRF). The WRF-ARW version 4, available from the WRF website was used in the present study (WRF, 2019).

This model supports the initial and lateral boundary conditions that are obtained in GRIB format from various global models, such as: ERA-Interim reanalysis data, North American Model (NAM), Rapid Update Cycle (RUC), Agricultural Meteorology (AGRMET) from the Air Force Weather Agency - AFWA), Global Forecast System (GFS) analysis products, and others, as described by Wang et al. (2019).

Static geographical data are required for model grids, such as soil layers, land use category, terrain altitude, average annual soil temperature, monthly vegetation fraction, and monthly albedo. The global data sets for each of these fields are provided through the WRF download page at http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_sources_wps_geog.html. Many of the datasets are available in one resolution only, but others are available to be downloaded either with high or low resolutions. A higher data resolution implies in higher computational costs, though the computational cost will in fact be defined by the grid resolution used by modeler.

For the representation of the surface model, the user can choose one from a set of three cartographic projections that seeks to offer the best possible description of the surface for each latitude range, where the Polar Projection is indicated for high latitude domains, Lambert's Conformal Projection for domains of medium latitude and Mercator Projection is suitable for low latitude domains. The Cylindrical Conformal is an alternative projection suitable to be used for global simulations, although it can also be used for regional domains anywhere on the planet. It is important to point out that although the WRF model is designed for regional analysis, it has the

flexibility to be used also for local studies. To do so, it allows multiple domains (nesting) which are used for the downscaling process, and therefore minimizing errors (WARNER, 2010).

For vertical coordinates the model uses a hybrid sigma pressure vertical coordinate system, defined in relation to the top pressure of the atmosphere (upper boundary), and it considers variations in topography, that promote variations in hydrostatic pressure along the column. In the version 4 of the WRF model, the vertical coordinate has been generalized to allow the influence of the terrain on the coordinate surfaces which are quickly removed with increasing height above the surface, so that the higher layers receive less influence from the topography (SKAMAROCK et al., 2019).

The WRF-ARW supports an Arakawa-C grid format, where the time integration is performed with 2nd and 3rd order Runge-Kutta schemes and has a high order advection scheme (SKAMAROCK et al., 2019). The interactions between the atmosphere and surface are described from the governing dynamic equations solved by the solvers.

Figure 1 was adapted from the study of Meyer, D. and Riechert, M. (2019), and shows a workflow representation for the WRF-ARM model structure, where the output data from each application works as the input to the following one.

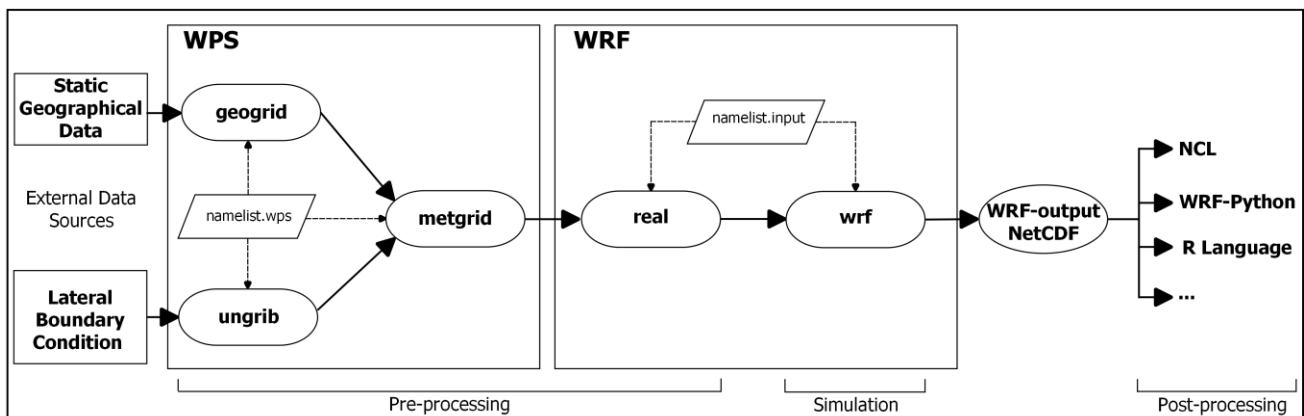


Figure 1 - Typical workflow for the WRF-ARW model.

The WRF Pre-Processing System (WPS) module is intended to prepare the input for the real processing program, and it is composed of three applications which are set up in the “namelist.wps” file: (a) geogrid: defines the domains and interpolates static geographic data, available in WPS binary format, for the grids; (b) unbrib: extracts weather data for initial and lateral boundary conditions, distributed in GRIB format and is provided for any global model; (c) metgrid: horizontally interpolates the weather data extracted by ungrib to the grid defined by the “geogrid”.

The WRF module is divided split in two submodules. The first is the “real”, which performs a vertical interpolation of atmospheric data previously interpolated horizontally by the “metgrid”, thus

completing the preprocessing step. The last application to be run is the “wrf” which is responsible for using all the data prepared in the previous steps, performing the simulation from the definition of the physical parameters already set up in the “namelist.input” file (WANG et al., 2019).

Post-processing can be performed in several programming languages being the most common NCL, WRF-Python and R. In this study post-processing was performed in RStudio v.1.2.1335 (RSTUDIO, 2019), for extraction and manipulation of data generated by the model, as well as mathematical and statistical operations for time series analysis. To produce the maps, and to represent geoscientific information, the software QGIS v.3.8.0 was used (QGIS, 2019).

2.2. WRF experiment design

The model was set up with two nested domains where the external domain (D1) is composed of a 67 x 54 grid with spatial resolution of $\Delta x = \Delta y = 0,15^\circ$ (~ 16,5 km), while the internal domain (D2) is composed of a grid of 120 x 81 cells with spatial resolution of $\Delta x = \Delta y = 0,05^\circ$ (~ 5,5 km). The coordinates of the central point of the domains are $43,550^\circ$ W / $22,077^\circ$ S, with the nesting arrangement being constructed so that the finer grid covers the entire area of the Paraíba do Sul River watershed. The coordinate system used was geographic and the projection was the Cylindrical Conformal. In Figure 2 it is shown the nesting of the domains D1 and D2.

The vertical profile of the model was configured for 35 “sigma” layers at 5000 Pa to the top of the atmosphere, thus setting the vertical boundary condition for model integration. The integration time interval was 90 s and the model output setup defined to save data at every hour. Static data was defined from the standard “high resolution” option provided by the model.

The initial and lateral boundary conditions for the experiments were obtained from the numerical GFS analysis data provided by the National Centers for Environmental Prediction (NCEP), which holds the atmospheric information with a 6h temporal resolution and a 0.25° spatial resolution.

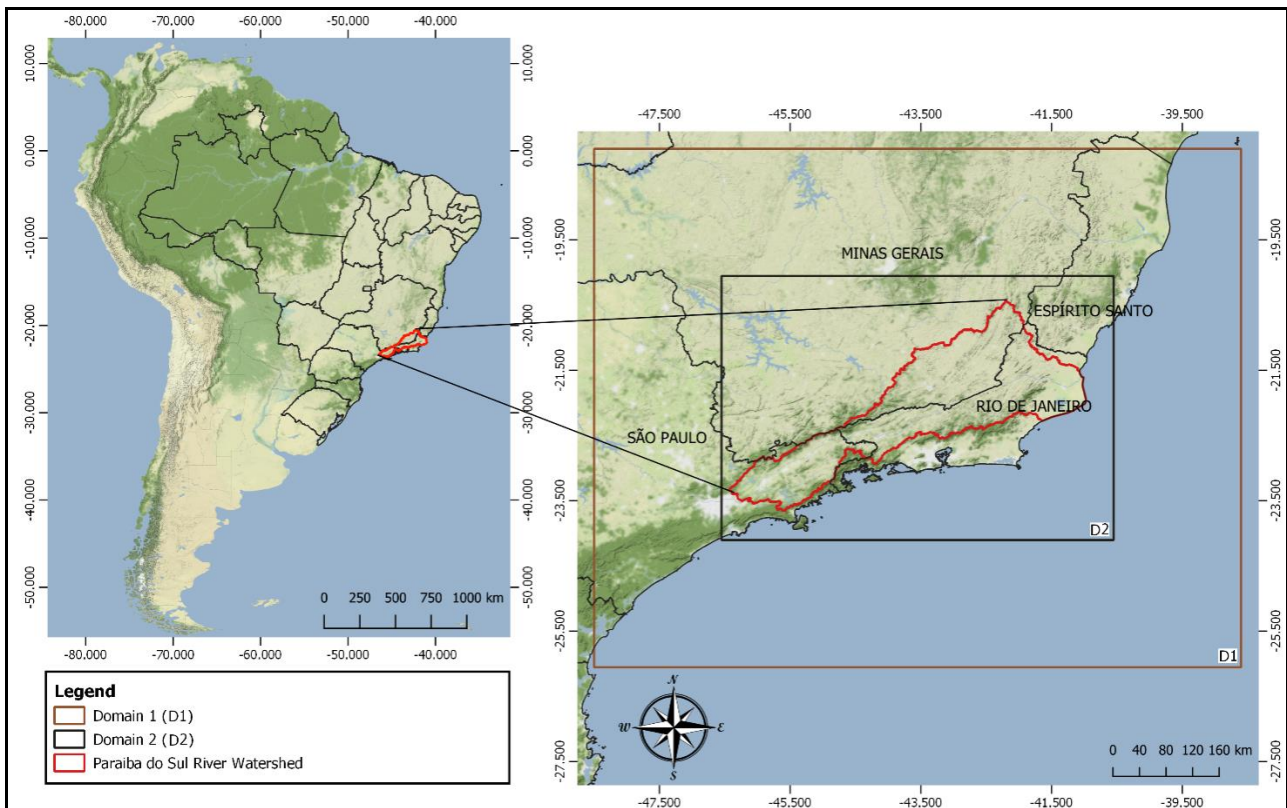


Figure 2 – Location of Paraíba do Sul River watershed and computational domain representation.

In order to determine the period of simulation, it was used a methodology similar to the study of Di et al. (2015), who sought into the Chinese summer period, the most unstable days, to perform their experiments. Thus, it was chosen to be simulated the Brazilian summer period between December 21th, 2018 and March 20th, 2019, since this period is characteristic for receiving the highest amount of rainfall in the tropical regime.

For the identification of the date of greatest instability, it was observed the day with the highest intensity of average rainfall, recorded by 19 Brazilian National Institute of Meteorology (INMET) automatic stations, distributed within the Paraíba do Sul River watershed as shown in Figure 3. Data recorded by these stations are of public domain and are available at website <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Such sets of data were subsequently used for model evaluation.

In order to determine the average rainfall into the watershed it was performed the arithmetic sum of the accumulated rain at all automatic stations installed, divided by the number of stations observed. The date with the highest rainfall observed was January 4th, 2019, with the accumulated rain of 486.8mm and an average daily rainfall of 28.6 mm, as shown in Figure 4. Two days before and after January 4th, 2019, were considered in the simulation, in order to ensure that the model observes the entire period of instability. The simulations started at 0000 UTC, January 2nd, 2019 and ended at 0000 UTC, January 6th, 2019, being excluded from the analysis the spin-up of the first 24h

of simulation corresponding to January 2nd, 2019, in order to eliminate the instabilities related to the beginning of the simulation.

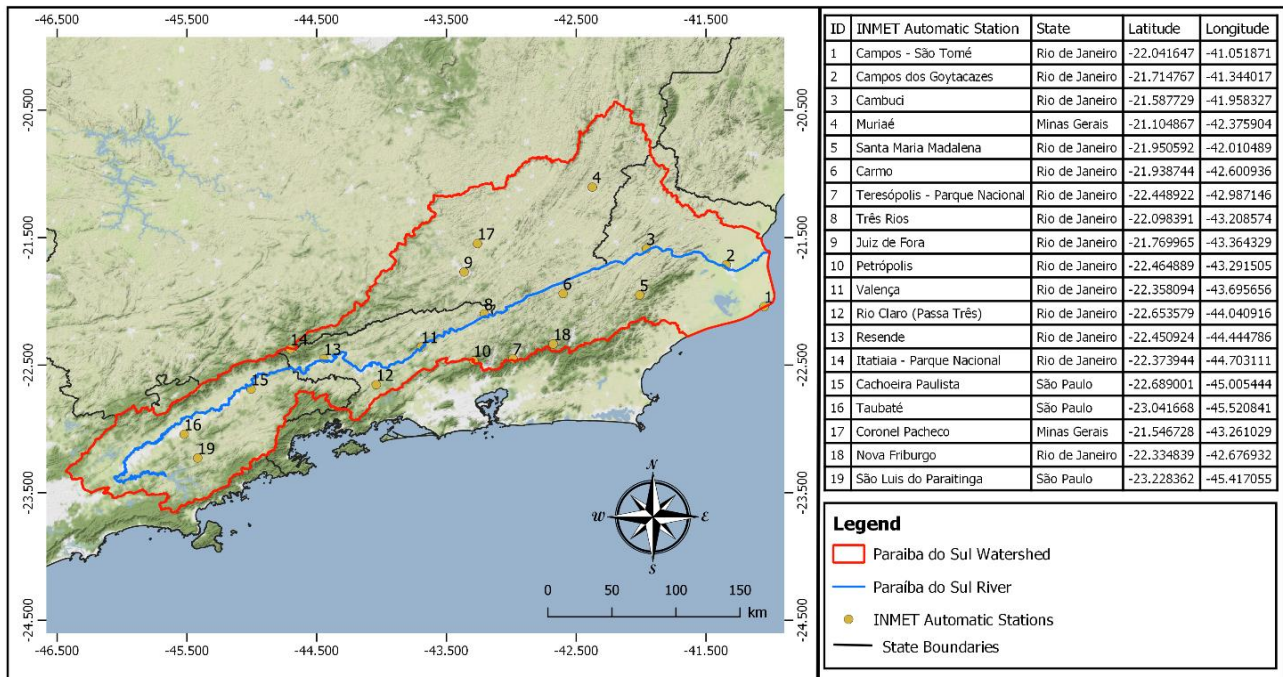


Figure 3 – Distribution of INMET’s meteorological automatic stations within the Paraíba do Sul watershed

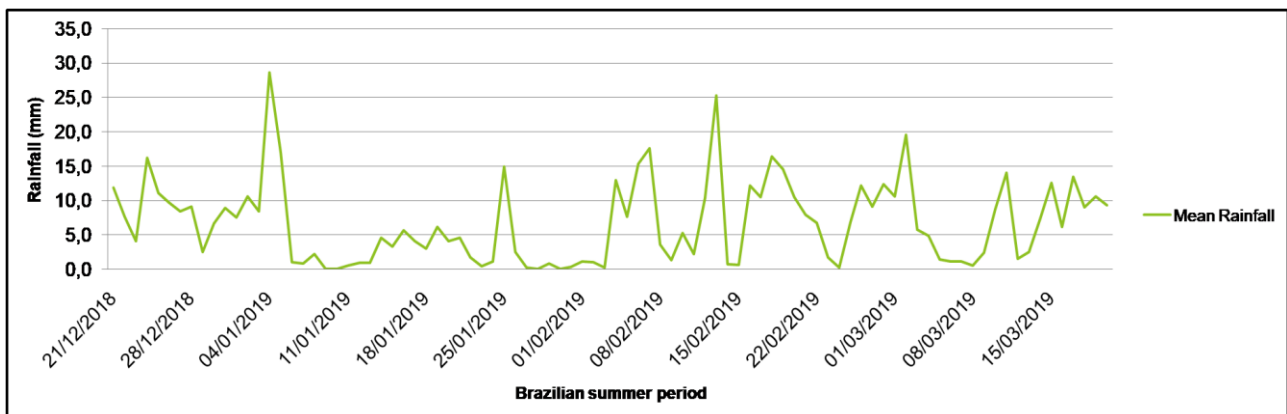


Figure 4 – Mean rainfall from 19 INMET automatic stations into the Paraíba do Sul watershed during 2018/2019 summer.

2.3. Cumulus and Microphysical Parameterization Sets

The planetary boundary layer, surface layer, surface model, longwave radiation and shortwave radiation schemes were determined from experiments performed with parameterizations already tested in the region adapted to the model configuration proposed in this paper. Once identified the most representative simulation among the experiments already performed in the basin

watershed, this study intends to make combinations of microphysical and convective schemes to identify the best representation of the precipitation. All possible combinations were performed between seven microphysics schemes and seven cumulus schemes, totaling 49 experiments, in order to determine the best performance combination.

2.3.1 Cumulus Schemes Short Description

This study focuses on seven cumulus physics options, described as follows, according to Skamarock et al. (2019):

Kain-Fritsch (KF): It utilizes a simple cloud model with moist updrafts and downdrafts, including the effects of detrainment, entrainment, and relatively simple microphysics. A new way to compute perturbation temperature is added. This perturbation temperature is a function of horizontal and vertical moisture advection, rather than vertical velocity.

Betts-Miller-Janjic (BMJ): The deep convection profiles and the relaxation time are variable and depend on the cloud efficiency, a dimensionless parameter that characterizes the convective regime. The cloud efficiency depends on the entropy change, precipitation, and mean temperature of the cloud. The shallow convection moisture profile is derived from the requirement that the entropy change be small and nonnegative.

Grell-Devenyi (GD): Grell and Devenyi introduced an ensemble cumulus scheme in which effectively multiple cumulus schemes and variants are run within each grid box, and then the results are averaged to give the feedback to the model. The schemes are all mass-flux type schemes, but with differing updraft and downdraft entrainment and detrainment parameters, and precipitation efficiencies. These differences in static control are combined with differences in dynamic control, which is the method to determine the cloud mass flux. The dynamic control closures are based on convective available potential energy, low-level vertical velocity, or moisture convergence.

Grell-Freita (GF): This scheme relates the convective updraft fraction to the entrainment rate, which in turn is related to the cloud radius. As the grid size decreases, the fractional updraft area increases, which is equivalent to decreasing the unit mass flux required to stabilize the atmosphere.

Grell 3D (G3D): This scheme is distinguished from other cumulus schemes by allowing subsidence effects to be spread to neighboring grid columns, making the method more suitable to grid sizes less than 10 km, while it can also be used at larger grid sizes where subsidence occurs within the same grid column as the updraft.

Tiedtke: This is a mass-flux scheme, and it parameterizes deep, shallow and midlevel convection. It represents the cloud ensemble by a bulk cloud model, and considers entrainment and detrainment and downdrafts. Turbulent entrainment and detrainment are added and turbulent entrainment for shallow convection is increased to promote boundary layer cloud formation.

New Tiedtke (NT): It is an updated version of Tiedtke scheme. The updates include trigger functions for deep and shallow convection, closures for deep and shallow convection, convective adjustment time scale, entrainment and detrainment rates for all types of convection, conversion from cloud water/ice to rain/snow and options for momentum transport. The entrainment for deep convection is dependent on environmental moisture which helps in the simulation of tropical systems.

2.3.2 Microphysical Schemes Short Description

The following is a short description of the selected microphysical schemes to be considered in this study, which corresponds to the same set studied by Skamarock et al. (2019):

Kessler: It is a simple warm cloud scheme that includes water vapor, cloud water, and rain. The microphysical processes included are: the production, fall, and evaporation of rain; the accretion and auto conversion of cloud water; and the production of cloud water from condensation.

Purdue Lin: Six classes of moisture variables are included: water vapor, cloud water, rain, cloud ice, snow, and graupel. Compared to Kessler, the treatment of ice processes in this and all the other microphysics options increases the level of sophistication, and makes it more generally suitable for use in research studies.

WSM3: This scheme predicts three categories of moist variables: water vapor, cloud water/ice, and rain/snow, making it a so-called simple-ice scheme. It follows the Dudhia (1989) study in assuming cloud water and rain for temperatures above freezing, and cloud ice and snow for temperatures below freezing. This scheme is computationally efficient for the inclusion of ice processes, but lacks supercooled water and gradual melting rates.

WSM5: This scheme is similar to the WSM3 simple ice scheme. However, water vapor, rain, snow, cloud ice, and cloud water are held in five different arrays. Thus, it allows supercooled water to exist, and a gradual melting of snow falling below the melting layer. This scheme is efficient in intermediate grids between the mesoscale and cloud-resolving grids.

WSM6: The six-class scheme extends the WSM5 scheme to include graupel and its associated processes. A new method is introduced for representing mixed-phase particle fall speeds for the snow and graupel particles by assigning a single fall speed to both that is weighted by the mixing ratios, and applying that fall speed to both sedimentation and accretion processes.

Eta (Ferrier): The scheme predicts changes in water vapor and condensate in the forms of cloud water, rain, cloud ice, and precipitation ice (snow/graupel/sleet). The individual hydrometeor fields are combined into total condensate, and it is the water vapor and total condensate that are advected in the model. Local storage arrays retain first-guess information that extracts contributions of cloud water, rain, cloud ice, and precipitation ice of variable density in the form of snow, graupel, or sleet. The density of precipitation ice is estimated from a local array that stores information on the total growth of ice by vapor deposition and accretion of liquid water.

Goddard: A non-hydrostatic dynamic / microphysical multidimensional cloud resolution model. Performs explicit re-representation of “hot” rain and ice microphysics processes with their complex interactions with infrared and solar radiative transfer processes with surface processes.

2.4 Verification methods

There are several points to be considered in the validation of a model and the methodology imposed. Besides, the metrics may change according to the application of interest. Ferreira et al. (2008) describe Five different ways to validate a model: (a) comparison with the results of an equivalent model; (b) verification of balances expressing the conservation of mass and energy; (c) comparison with results of different numerical models in the design; (d) comparison between results of alternative formulations of the same model; and (e) comparison of model predictions with observations generated from physical stations. In the present work it is used an association of items

(d) and (e), as it proposes to test several parameterizations imposed on the same model, in relation to the data observed by the INMET physical stations, as well as to establish a comparison between simulations.

Three error metrics were used to represent the deviations between the predict (simulated) and the observed values:

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Phi'_i \quad (1)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Phi'_i)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\Phi'_i| \quad (3)$$

where:

$$\Phi'_i = \Phi_{i,p} - \Phi_{i,obs} \quad (4)$$

represents the difference between the predicted $\Phi'_{i,p}$ and the observed values $\Phi'_{i,obs}$, and N represents the number of observations. In the case of the present study, N=73, referring to the 72 hours of simulation added the initial condition.

BIAS represents the distance between simulated precipitation and observations, where positive values indicate that the model tends to overestimate the observed values, while negative values imply that the model tends to underestimate them. The root mean square error (RMSE) is a measure of the magnitude of the mean error between simulated and observed values, representing the standard deviation of differences. The mean absolute error (MAE) represents the absolute mean deviation of simulated precipitation from observations. For all error measures the best values are represented by their proximity to zero, which indicates a smaller distance between simulated and observed values, which implies a better fit.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Sensitivity Analysis Assessment of physical parameterization using previous studies in the region

The physical parameters tested were chosen from studies available in the literature for the region of interest, the Paraíba do Sul River Watershed. This initiative has a double goal, the first one is to provide a comparison with the experiments already carried out, and the second one is to promote a critical reflection, as well as an update on the previously proposed parametrizations.

Four studies were found, which are described in Table 1, and describe all seven schemes that make up the physical parameters: microphysics, cumulus (or convective), planetary boundary layer (PBL), surface layer, land surface, longwave and shortwave radiation.

The four physical parameterizations found (Table 1) were tested according to the model designed and analyzed using the statistical criteria described in the methodology i. e. the error metrics previously described. The model results time series referring to domain 2 (finer grid) were used, and domain 1 was used only as the first step in for the downscaling process.

Table 1 – Physical parameterizations found in the literature for studies conducted with WRF-ARW, in the States of Rio de Janeiro and São Paulo, Brazil, between 2012 and 2017.

Experiment	Study	Microphysics	Cumulus	PBL	Surface Layer	Land Surface	Longwave	Shortwave
1	SILVA et al. (2017)	WSM3	Kain–Fritsch	YSU	MM5 Monin–Obuckov	Noah land surface model	RRTM	Dudhia
2	BENDER (2012)	WSM3	Grell–Devenyi	YSU	MM5 Similarity Scheme	Noah land surface model	RRTM	Dudhia
3	SILVA et al. (2016)	WSM3	Grell–Devenyi	MYJ	ETA - Similarity Scheme	Noah land surface model	RRTM	Dudhia
4	SOUZA; RANGEL; CATALDI (2017)	WSM3	Kain–Fritsch	YSU	MM5 Similarity Scheme	Noah land surface model	RRTM	Dudhia

Data from the INMET automatic stations were used, corresponding to an hourly observed time series. In order to obtain predict time series (model results), the coordinates of the INMET automatic stations were used in the computation of the precipitation pixel value at every hour. Statistical tests were performed from the hourly average of all stations and all experiments. The analyzes were based on accumulated time series, and the objective was to verify the behavior of total rainfall in the watershed. The summary of the results found are shown in Table 2. The best values obtained are shown in boldface.

Table 2 – Result of experiments performed with the physical parameterizations previously used in the region of interest, Paraíba do Sul River Watershed.

Experiment	BIAS, Eq. (1) (mm)	RMSE, Eq. (2) (mm)	MAE, Eq. (3) (mm)
1	8.99	11.00	9.04
2	5.96	8.57	6.12
3	4.05*	6.82*	4.47*
4	8.25	10.19	8.32

*Best results

From the imposed methodology, experiment number 3 was the best result for all the tests performed, being the one that best represented the precipitation for the proposed period and model design. Positive values for the BIAS in all experiments demonstrate the tendency of the model to overestimate precipitation. MAE result associated with RMSE indicates that experiment number 3 corresponds to the most adjusted model. It is important to highlight that since it is an accumulated analysis, the deviations are added over time, tending to be larger in the final periods.

3.2 Sensitivity Analysis Assessment of Cumulus and Microphysics parameterization

Once determined that experiment 3 had the best performance, 49 experiments were proposed in order to consider all possible associations between the seven microphysics schemes and the seven convective schemes, previously described in sections 2.3.1 and 2.3.2. It was used the PBL (Planetary Boundary Layer), surface layer, land surface, shortwave radiation, and longwave radiation schemes of experiment 3, as described in Table 1.

The configurations of each convective and microphysical scheme association are identified in Table 3. Since experiment 3 already represents an association between convective and microphysical schemes, 48 possible associations are presented in the Table. The experiments were identified from

experiment number 5 on since the first four experiments have already been described in Table 1. The corresponding statistical comparison results are shown in Table 4.

Table 3 – Experiments set up combining seven microphysical schemes and seven cumulus schemes (section 2.3.1).

Experiment	Microphysics	Cumulus	Experiment	Microphysics	Cumulus	Experiment	Microphysics	Cumulus
5	WSM6	Grell-Devenyi	21	WSM3	Grell-Freitas	37	Purdue Lin	New Tiedtke
6	Eta (Ferrier)	Grell-Devenyi	22	WSM5	Grell-Devenyi	38	WSM3	New Tiedtke
7	Goddard	Grell-Devenyi	23	WSM5	Kain-Fritsch	39	WSM5	New Tiedtke
8	Kessler	Grell-Devenyi	24	WSM5	Grell-Freitas	40	WSM6	New Tiedtke
9	Purdue Lin	Grell-Devenyi	25	Eta (Ferrier)	New Tiedtke	41	Goddard	Grell 3D
10	WSM6	Kain-Fritsch	26	Eta (Ferrier)	Betts-Miller-Janjic	42	Kessler	Grell 3D
11	Eta (Ferrier)	Kain-Fritsch	27	Eta (Ferrier)	Grell 3D	43	Purdue Lin	Grell 3D
12	Goddard	Kain-Fritsch	28	Eta (Ferrier)	Tiedtke	44	WSM3	Grell 3D
13	Kessler	Kain-Fritsch	29	Goddard	Betts-Miller-Janjic	45	WSM5	Grell 3D
14	Purdue Lin	Kain-Fritsch	30	Kessler	Betts-Miller-Janjic	46	WSM6	Grell 3D
15	WSM3	Kain-Fritsch	31	Purdue Lin	Betts-Miller-Janjic	47	Goddard	Tiedtke
16	WSM6	Grell-Freitas	32	WSM3	Betts-Miller-Janjic	48	Kessler	Tiedtke
17	Eta (Ferrier)	Grell-Freitas	33	WSM5	Betts-Miller-Janjic	49	Purdue Lin	Tiedtke
18	Goddard	Grell-Freitas	34	WSM6	Betts-Miller-Janjic	50	WSM3	Tiedtke
19	Kessler	Grell-Freitas	35	Goddard	New Tiedtke	51	WSM5	Tiedtke
20	Purdue Lin	Grell-Freitas	36	Kessler	New Tiedtke	52	WSM6	Tiedtke

The joint analysis of Tables 3 and 4 shows a group of 4 best performing combinations, with numerically similar results. Thus experiments 24, 41, 43 and 45 stand out from the rest, and form the group of the best adjusted models.

Table 4 – Results comparison for the experiments performed with the combination of seven microphysical schemes (section 2.3.2) and seven cumulus schemes (section 2.3.1)

Experiment	BIAS (mm)	RMSE (mm)	MAE (mm)	Experiment	BIAS (mm)	RMSE (mm)	MAE (mm)	Experiment	BIAS (mm)	RMSE (mm)	MAE (mm)
5	5.72	8.33	5.85	21	-3.89	6.19	4.37	37	-9.27	12.01	9.27
6	4.58	6.87	4.87	22	4.26	6.83	4.64	38	-4.71	6.79	4.86
7	3.40	6.48	4.79	23	13.20	16.31	13.35	39	-4.83	6.84	4.92
8	3.74	6.47	4.49	24	-1.72*	2.84*	2.18*	40	-6.48	9.52	6.59
9	5.11	8.00	5.30	25	-8.31	10.74	8.31	41	-0.86*	3.32*	2.43*
10	13.72	16.86	13.85	26	-16.26	21.48	16.26	42	-1.72	4.10	2.86
11	11.55	13.88	11.68	27	-3.46	5.53	3.78	43	-0.72*	3.36*	2.44*
12	8.30	10.34	8.40	28	-11.49	14.42	11.49	44	1.32	4.34	2.87
13	14.91	18.03	15.07	29	-14.47	18.70	14.47	45	0.28*	3.33*	2.45*
14	18.74	22.97	18.89	30	-15.44	19.82	15.44	46	-1.00	3.58	2.74
15	10.02	12.50	10.21	31	-16.94	22.18	16.94	47	-13.48	17.48	13.48
16	-4.44	7.35	5.09	32	-17.87	23.33	17.87	48	-10.05	12.32	10.05
17	-8.05	10.12	8.05	33	-17.20	22.52	17.20	49	-10.71	13.03	10.71
18	-7.42	9.79	7.42	34	-17.19	22.47	17.19	50	-11.89	14.51	11.89
19	8.81	10.95	9.00	35	-9.85	13.06	9.85	51	-10.91	13.39	10.91
20	1.35	3.75	3.20	36	-9.05	11.88	9.05	52	-11.88	14.78	11.88

*Best results

Experiments 24, 41 and 43 presented negative BIAS which means that the model tended to underestimate the result in relation to the observations data. Experiment 45 was the only one that had a positive result value, so it overestimated the observed data. Regarding the MAE metric, all four best-performing experiments had a mean deviation of 2,5 mm and regarding RMSE the magnitude of error was lower at 3,5 mm for all best-performing experiments. Thus, all tests observe a very significant adjustment of the model to this group.

Just from a numerical evaluation analysis, the group with the four best experiments can be classified according to the RMSE alone. In the other words, just considering the magnitude of the error. From this point of view the experiments could be classified in this order: 24, 41, 45 and 43 (from the best to worst), even though the numerical difference is not really significant.

In order to observe the total precipitation behavior into the watershed, it was plotted the mean curves for the four best performing experiments, the accumulated mean curve observed at the INMET automatic stations, as shown in Figure 5. When analyzing the curves, it is possible to observe that they follow the same behavior, and consistently represent the cumulative precipitation into the watershed. Therefore, it is possible to observe that, from this analysis no major differences among best performing experiments was noticed.

Using the hourly analysis of the precipitation behavior, as shown in Figure 6, it was possible to observe that the period of greatest instability occurred in the interval between the 40th and 57th hour of simulation, followed by a period of no rain until the 64th hour of simulation, and finally for a period of low average rainfall in the watershed of approximately 1.5 mm at the 70th hour. All

experiments followed the observed curve (black line - main rainfall from stations), including the period of greatest instability. However, in all cases the experiments overestimated precipitation in the final 10 hours of the simulation. Considering the hourly analysis only, the experiment 41 showed the smallest deviation in the final 10 hours, among the best performing grouping.

So the Goddard microphysics combination associated with the Grell 3D convective scheme (experiment 41) can be considered the one that best represented the average rainfall of the watershed, although the difference was not significant. Corroborating this result, Padilha (2011) observed in her study that the Goddard microphysics scheme was also the one that best represented rainfall when analyzing localized events of instabilities in the city of Rio de Janeiro. But, the authors in that study tested only microphysics schemes.

Considering individually, the convective (or cumulus) results confirms the studies of Patel et al. (2019) and Mayor and Mesquita (2015), who using a grid spacing similar to the one proposed in this paper identified the cumulus scheme as a factor of greatest influence on precipitation simulation. The study of Rodríguez et al. (2016), proposes variations only in the cumulus parameterization for rainfall forecast in the southern region of Brazil, recognizing this as the most relevant for this type of study. This information becomes relevant because establishes experimentally the importance of using and adjusting this scheme for the grid configured in this study (~5.5 km), and the region under analysis. About convective schemes, Skamarock et al. (2019) states that these are not used for grids of less than 4 km, since precipitation is solved only by microphysics, whereas for grids larger than 10 km this should be used. According to the author, the interval between 5 and 10 km (such as in this paper) is not mandatory and depends of application.

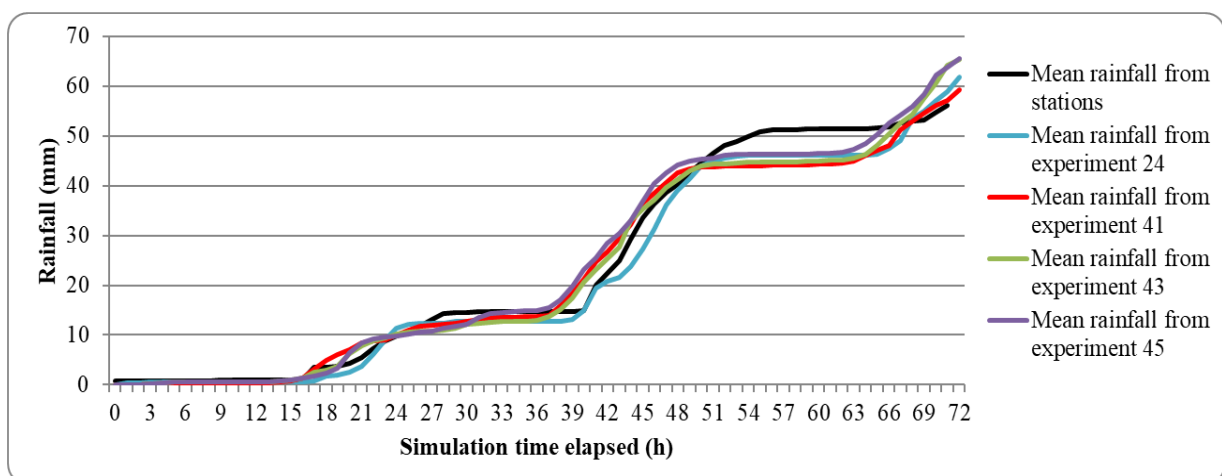


Figure 5 – 72 hours of cumulative mean curves of the 4 best simulations and average observed data (January 3rd-6th, 2019).

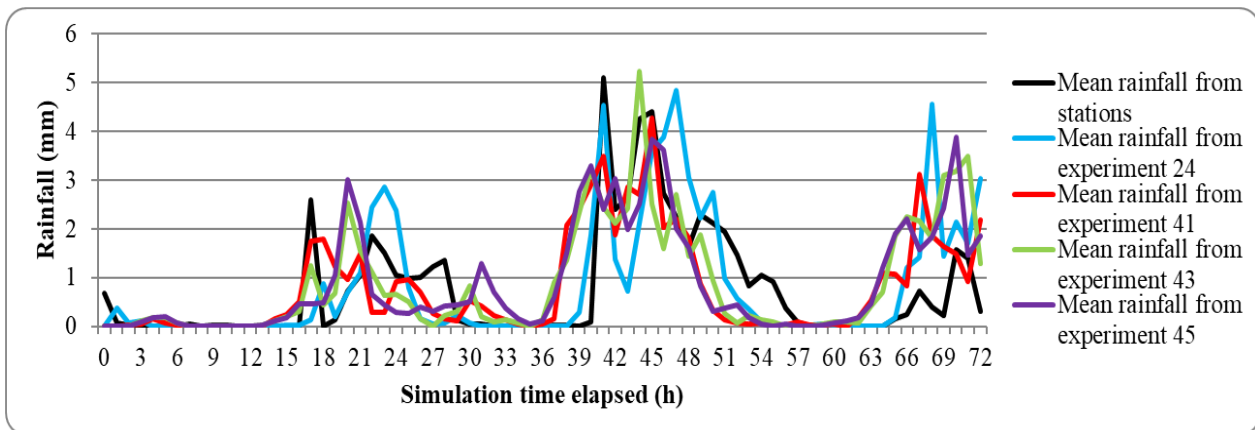


Figure 6 – 72 hours of hourly mean curves of the four best simulations and average observed data (January 3rd-6th, 2019).

The results showed that the Grell 3D convective scheme produced the smallest deviation for the region in all microphysical combinations, in contrast to the Betts-Miller-Janjic, Kain-Fritsch and Tiedtke schemes, in this order, which yielded the largest deviations. The study of Calado et al. (2018) for the same basin concluded that the Betts-Miller-Janjic and Kain-Fritsch schemes performed better, however, the mentioned study did not consider all the convective schemes tested in the present study, and did not use the WRF model.

Regarding the microphysical schemes, it was observed that these did not produce large deviations when analyzed separately. Analyzing the experiments in which the seven microphysics schemes are associated with the best performing convective scheme (Grell 3D), it was observed that the largest deviation was found for the Eta (Ferrier) microphysics, as opposed to the work of Calado et al. (2018) that led to the best result for the region using this scheme.

In order to analyze the spatialization of the accumulated period precipitation, it was proposed the interpolation, classification and building of isoyetas precipitation maps, as shown in Figure 7.

The Figure 7(a) was built from the data observed in the 19 INMET automatic stations. Since the data are spatially unevenly distributed, it was adopted the Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation in order to estimate the precipitation in the places (pixels) without observed data. This technique is widely used when there are no values available for different parameters of interest in a given domain, not only precipitation. As a statistical technique the data are just estimates. Therefore, there is no intention in getting the correct value because it depends on the points measurement. The IDW was chosen because it is indicated in the case of low points density. Thus, more control points improve interpolation quality. In a very large watershed area such as the Paraiba do Sul River watershed, there are not enough observation stations available to correctly represent the precipitation

spatialization. Then, the computational simulation is a viable alternative to determine the magnitude of precipitation (see Figure 7).

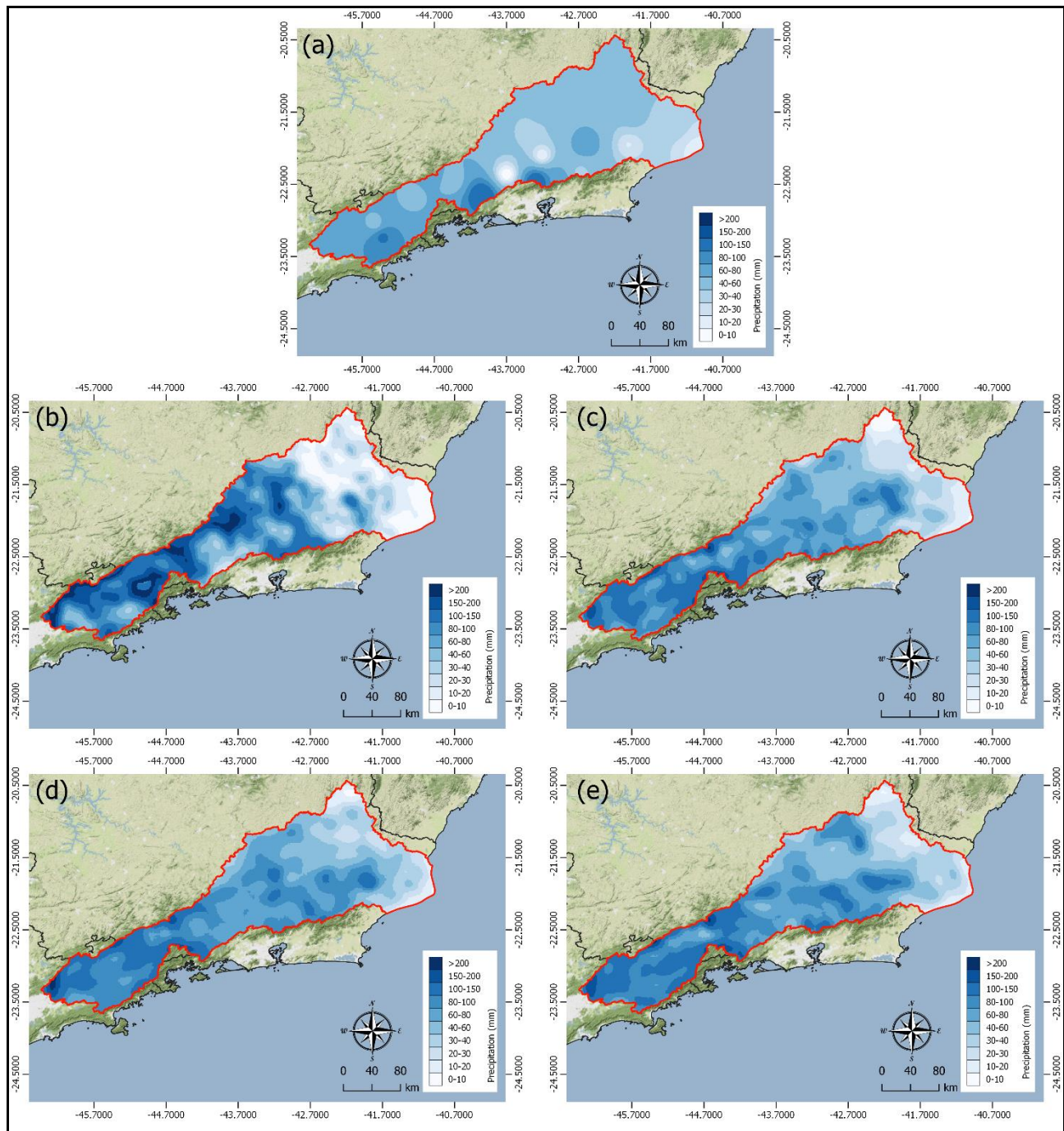


Figure 7: Accumulated Precipitation graphical representation for the Paraíba do Sul River Watershed.

(a) Observed data in the INMET automatic stations with Inverse of Distance Weighting (IDW) interpolation. (b) Predicted data from WRF model with experiment 24 and Ordinary Kriging interpolation. (c) Predicted data from WRF model with experiment 41 and Ordinary Kriging interpolation. (d) Predicted data from WRF model with experiment 43 and Ordinary Kriging interpolation. (e) Predicted data from WRF model with experiment 45 and Ordinary Kriging interpolation.

The Figures 7(b-e) represent the results obtained with the WRF-ARW model for experiments 24, 41, 43 and 45, respectively. It was used an ordinary Kriging as interpolation method in order to get a spatialization of precipitation. The Kriging is a geostatistical approach for surface estimation where the prediction at an unsampled location is calculated as a weighted linear combination of the available data that minimizes the expected squared error (VERDIN et al., 2016). This is a popular method applied to a variety of hydrologic and climatological applications and is indicated to cases with a large density of points. In this case, it is suitable for the studies performed, since there is a precipitation value calculated with the model at every ~5 km.

Qualitative data analysis reveals that the group of best performing experiments with similar numerical results, as shown in Table 4, are not similar in spatialization distribution of precipitation. Even though Figures 7(c-e) have a similar spatialization of precipitation, Figure 7(b) presents a very different distribution.

4. CONCLUSIONS

This study was conducted with the purpose of performing a sensitivity test to the physical parameters present in the WRF model, focusing on rainfall into the Paraíba do Sul river watershed.

For the planetary boundary layer, surface layer, land surface, longwave radiation and shortwave radiation, the Mellor-Yamada-Janjic, ETA model similarity theory, Noah land surface model, RRTM and Dudhia schemes, respectively, were identified as the best performers. This result was obtained from tests performed in previous studies.

It was noticed that cumulus parameterizations are more important than microphysical schemes for the case study considered, and the best-performing was the Grell 3D convective scheme in all tested experiments.

The combinations of WSM5 and Grell-Freitas; Goddard and Grell 3D; Perdue Lin and Grell 3D; WSM5 and Grell 3D form a group with four numerically similar results. The experiments were subjected to a statistical analysis, with accumulated graphs interpretation, hourly graphs interpretation and spatial analysis from isoyetas. In general, they present similar results representing consistently the precipitation. The spatial analysis identified that experiment 24 differs from the others best-performing results. The ensembles of analyzes shows that the combination of Goddard and Grell 3D might be considered as the one that best represented the average rainfall of the watershed, although the difference was not very significant.

It is important to highlight that, the Paraíba do Sul River watershed has a great territorial extension, with a great latitudinal and altimetric variation, and therefore, the experiments aimed at finding an average representation of precipitation into the watershed. Thus, the effect caused at a point at which the model overestimates the observed data is counterbalanced by a point at which the model underestimates the observed data. So, a sensitivity testing in a single station or for another group of stations may present different results, being composed of a new sensitivity study to meet particular needs.

5. REFERENCES

BENDER, F. D. Checking Sao Paulo weather forecast with WRF operating model. 2012. 164p. Atmospheric Sciences Mastership Thesis – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo: USP. (in Portuguese).

CALADO, R. N.; DERECZYNSKI, C. P.; CHOU, S. C.; SUEIRO, G.; MOURA, J. D. O.; RANDER, V.; BRASILIENSE, C. S. Eta-5km Model Simulation Performance Assessment for the Heavy Rainfall Case in the Paraíba do Sul River Basin in January 2000. *REVISTA BRASILEIRA DE METEOROLOGIA*, v. 33, p. 83-96, 2018. (in Portuguese).

CEIVAP, 2019. Geoenvironmental Data. Available in: <www.ceivap.org.br/dados-gerais.php>. Access in: June 26th, 2019.

DI, Z.; DUAN, Q; GONG, W.; WANG, C; GAN, Y.; QUAN, J.; LI, J.; MIAO, C.; YE, A.; TONG, C. Assessing WRF model parameter sensitivity: A case study with 5 day summer precipitation forecasting in the Greater Beijing Area. *Geophysical Research Letters*, v. 42, n. 2, p. 579-587, 2015.

DUDHIA, J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, *J. Atmos. Sci.*, 46, 3077–3107, 1989.

FERREIRA, P.; CASTANHEIRA, J. M.; ROCHA, A.; FERREIRA, J. Sensitivity study of surface forecasts in Portugal, by WRF, in view of the variation of physical parameters. *XXX Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española*, Zaragoza, 2008. (in Portuguese).

GUNWANI, P.; MOHAN, M. Sensitivity of WRF model estimates to various PBL parameterizations in different climatic zones over India. *Atmospheric research*, v. 194, p. 43-65, 2017.

LIU, D; YANG, B; ZHANG, Y.; QIAN, Y; HUANG, A; ZHOU, Y.; ZHANG, L. Combined impacts of convection and microphysics parameterizations on the simulations of precipitation and cloud properties over Asia. *Atmospheric research*, v. 212, p. 172-185, 2018.

MAYOR, Y. G.; MESQUITA M. D. S. Numerical Simulations of the 1 May 2012 Deep Convection Event over Cuba: Sensitivity to Cumulus and Microphysical Schemes in a High-Resolution Model, *Advances in Meteorology*, vol. 2015. Article ID 973151, 16 pages, 2015.

MESQUITA, M. D. S. A Bayesian approach for evaluating regional climate models. 2012. Available in: <https://statmos.washington.edu/cbms/mesquita_Poster.pdf>. Access in: August 5th, 2019.

MEYER, D.; RIECHERT, M. Open source QGIS toolkit for the Advanced Research WRF modelling system. *Environmental Modelling & Software*, 112, 166–178, 2019.

MOHAN, P. R.; SRINIVAS, C. V.; YESUBABU, V.; BASKARAN, R.; VENKATRAMAN, B. Simulation of a heavy rainfall event over Chennai in Southeast India using WRF: Sensitivity to microphysics parameterization. *Atmospheric Research*, Vol. 210, 15 September 2018, Pages 83-99. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.04.005>

PADILHA, S. F. Heavy rain event simulations in the state of Rio de Janeiro using the WRF model. 127p. 2011. *Meteorology Mastership Thesis – Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza: UERJ.* (in Portuguese).

PATEL, P.; GHOSH, S.; KAGINALKAR, A.; ISLAM, S.; KARMAKAR, S. Performance evaluation of WRF for extreme flood forecasts in a coastal urban environment. *Atmospheric Research*, 223, 39-48, 2019.

QGIS. Web: <http://www.qgis.org/en/site/forusers/download.html>. Access in May 30th, 2019.

RODRÍGUEZ, L. G.; ANABOR, V.; PUHALES, F. S.; PIVA, E. D. Estimation of the probability of precipitation from nonparametric statistical techniques applied to numerical WRF simulations: a case study. *Ciência e Natura*, v. 38, p. 491-497, 2016. (in Portuguese).

RSTUDIO. Web: <http://www.rstudio.com/products/rstudio/download/>. Access in September 10th, 2019.

SILVA, F. P.; ROTUNNO FILHO, O. C. SAMPAIO, R. J.; DRAGAUD, I. C. D. V; ARAÚJO, A. A. M.; SILVA, M. G. A. J; PIRES, J. D. Evaluation of atmospheric thermodynamics and dynamics

during heavy-rainfall and no-rainfall events in the metropolitan area of Rio de Janeiro, Brazil. *Meteorology and Atmospheric Physics*, p. 1-13, 2017.

SILVA, F. P.; SILVA, M. G. A. J.; MENEZES, W. F.; ALMEIDA, V. A. Evaluation of Atmospheric Indicators Using the WRF Numerical Model in Rain Events in Rio de Janeiro City. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 38, n. 2, p. 81-90, 2016. (in Portuguese).

SKAMAROCK, W.; KLEMP, J.; DUDHIA, J.; Gill, D.; BARKER, D.; DUDA, M.; HUANG, X.; WANG, W.; POWERS, J. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4. NCAR Technical Note NCAR/TN-556+STR, 145p, 2019.

SOUZA, C. V. F.; RANGEL, R. H. O.; CATALDI, M. Numerical Assessment of the Influence of Urbanization on the Convection Regime and Precipitation Patterns of the São Paulo Metropolitan Region. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 32, n. 4, p. 495-508, 2017. (in Portuguese).

VERDIN, A.; FUNK, C.; RAJAGOPALAN, B.; KLEIBER, W. Kriging and Local Polynomial Methods for Blending Satellite-Derived and Gauge Precipitation Estimates to Support Hydrologic Early Warning Systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 54, no. 5, pp. 2552-2562, May 2016. doi: 10.1109/TGRS.2015.2502956.

WANG, W.; BRUYERE, C.; DUDA, M.; DUDHIA, J.; GILL, D.; LIN, H.-C.; MICHALAKES, J.; RIZVI, S.; ZHANG, X.; BEEZLEY, J. D.; COEN, J. L.; KAVULICH, M.; WERNER, K.; CHEN, M.; BERNER, J.; MUNOZ-ESPARZA, D.; REEN, B.; FOSSEL, K.; MANDEL, J.: ARW Version 4 Modeling System User's Guide, Mesoscale & Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, 2019.

WARNER, T. T. Numerical weather and climate prediction. Cambridge University Press, 2010.

WRF Modeling System Download. Web: http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_source.html. Access in September 14th, 2019.

YANG, Q.; DAI, Q.; HAN, D.; CHEN, Y.; ZHANGA, S. Sensitivity analysis of raindrop size distribution parameterizations in WRF rainfall simulation, *Atmospheric Research*, Vol. 228, 1 November 2019, Pages 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.05.019>.

ARTIGO CIENTÍFICO 3

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE VAZÕES NO RIO PARAÍBA DO SUL - BRASIL UTILIZANDO O MODELO HIDROLÓGICO MOHID *LAND* E O MODELO ATMOSFÉRICO WRF-ARW

*NUMERICAL CHANNEL FLOW SIMULATION IN THE PARAÍBA DO SUL RIVER - BRAZIL,
USING THE MOHID LAND HYDROLOGICAL MODEL AND THE WRF-ARW ATMOSPHERIC
MODEL*

Dhiego da Silva Sales - IFFluminense/PPEA

Vicente de Paulo Santos de Oliveira - IFFluminense/PPEA

Jader Lugon Junior - IFFluminense/PPEA

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo a modelagem hidrológica da Bacia do Rio Paraíba do Sul, na plataforma *MOHID Land*, para estudo das vazões, a partir de seis diferentes entradas de precipitação. Foram criados dois cenários com variação temporal da chuva a partir da precipitação medida em 17 estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) na bacia e interpoladas na ferramenta *FillMatrix*, pelos métodos *Inverse Distance Weighting* (TIN) e *Triangulated Irregular Networks* (IDW), respectivamente. Outros quatro cenários foram criados a partir de quatro experimentos simulados no modelo atmosférico WRF-ARW, correspondendo à variação espacial e temporal da precipitação. O modelo hidrológico foi alimentado com coeficiente de *Manning*, *Curve Number*, seções transversais, extraídas do banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), e a curva de operação dos reservatórios extraídas da sala de situação no *website* SIGA-CEIVAP. O período de análise corresponde ao mês de janeiro de 2019 (01/01/2019 00 UTC e 01/02/2019 00 UTC), com avaliação horária. Os dados de vazão medidos utilizados foram extraídos da estação fluviométrica da ANA, em Campos dos Goytacazes, e foram utilizados para os testes estatísticos de BIAS, MAE, MAPE, RMSE e Correlação de Pearson (R) para avaliação do modelo. Os resultados demonstraram que uma vez estabelecida a parametrização física de melhor desempenho no modelo atmosférico (WRF), a chuva modelada tem um desempenho superior a chuva interpolada (observada) para implementação no modelo hidrológico (MOHID) para estudo das vazões.

Palavras chave: Estudo Hidrológico. Hidrologia. Geografia Física. Geotecnologias.

ABSTRACT

The aimed of the present work was the hydrological modeling ng of the Paraíba do Sul River Basin, on the MOHID Land platform, in order to study of channel flows, from six different precipitation inputs. Two scenarios were created with temporal variation of rain from the precipitation measured in 17 automatic stations of the National Institute of Meteorology (INMET) in the watershed and interpolated in the FillMatrix tool, by the Inverse Distance Weighting (TIN) and Triangulated Irregular Networks (IDW) methods, respectively. Other four scenarios were created from four experiments simulated in the atmospheric model WRF-ARW, corresponding to the spatial and temporal variation of precipitation. The hydrological model was fed with Manning coefficient, Curve Number, cross sections extracted from the database of the National Water Agency (ANA) and operation curve of the reservoirs extracted from the situation room on the SIGA-CEIVAP website. The analysis period corresponds to the month of January 2019 (01/01/2019 00 UTC and 01/02/2019 00 UTC), with hourly evaluation. The measured channel flow data used were extracted from the ANA fluviometric station, in Campos dos Goytacazes, and were used for the statistical tests of BIAS, MAE, MAPE, RMSE and Pearson's Correlation (R) to evaluate the model. The results showed that once the physical parameterization of better performance in the atmospheric model (WRF) was established, the modeled rain has a performance superior to the interpolated (observed) rain for implementation in the hydrological model (MOHID) to study the channel flows.

Keywords: *Hydrological Study. Hydrology. Physical geography. Geotechnologies.*

1. INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica é entendida como uma área de captação natural de água, constituída de divisores topográficos os quais direcionam, por meio de uma complexa rede de canais, as águas oriundas das chuvas para um curso principal que irá desaguar em um único ponto de menor altitude denominado exutório (TUCCI, 2012). São inúmeros componentes que constituem os processos hidrológicos em uma bacia, tais como a inclinação, altitude, tipo de solo, infiltração, escoamento superficial, distribuição das chuvas, que compõem este complexo sistema.

O ciclo hidrológico inclui os processos oriundos da atmosfera, superfície terrestre e subsuperfície. As chuvas caem da atmosfera, porém parte dela é interceptada pela vegetação e evapora de volta para a atmosfera, antes mesmo de chegar ao solo. A parcela restante das chuvas que

chegam ao solo pode escoar superficialmente (*runoff*) em função da declividade, até encontrar um curso d'água, ou pode infiltrar. A água da chuva que se infiltra atinge a água subterrânea por percolação, e parte dela se une ao escoamento do canal como fluxo de base. A evaporação total é o somatório da evaporação do dossel, transpiração e evaporação do solo e evaporação da água aberta. A vazão da bacia é a acumulação do escoamento do canal oriunda do escoamento superficial acrescida da contribuição das águas subterrâneas (fluxo de base). A chuva efetiva, ou seja, a parcela da chuva que efetivamente se torna escoamento superficial é responsável por proporcionar acréscimo de vazão aos cursos d'água na bacia (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

Entender a dinâmica de chuva-vazão em uma bacia hidrográfica é de extrema importância no que se refere ao planejamento e gestão de recursos hídricos, na medida em que os eventos de chuvas intensas, e, posteriormente vazão extrema, estão associadas às enchentes. Em contrapartida, a diminuição dos eventos de precipitação e acentuação dos processos de retirada da água para consumos diversos, implica numa redução das vazões, ocasionando problemas como os assoreamentos ao longo do curso e a intrusão salina na foz, gerando problemas de disponibilidade hídrica. Dentro deste contexto, a utilização da modelagem computacional se apresenta como ferramenta de baixo custo relativo para elaboração de estudos com diversos cenários, tendo este trabalho o foco na modelagem hidrológica da Bacia do Rio Paraíba do Sul para estudo de vazão.

O modelo hidrológico escolhido para o desenvolvimento deste trabalho é o MOHID, acrônimo de Modelo Hidrodinâmico, em sua plataforma MOHID *Land*, tendo sido este escolhido, em função de uma parceria entre IFF e o Instituto Superior Técnico (IST) no Centro de Pesquisa de Tecnologias Marinhas e Ambientais MARETEC da Universidade Técnica de Lisboa (UL), Portugal, que possui como possibilidade de entrada de precipitação a chuva constante no espaço e no tempo, a variação temporal da chuva e a variação espacial e temporal da chuva (MOHID WIKI, 2019).

O método da chuva constante é utilizada para condições específicas onde se deseja analisar o comportamento hidrológico de uma bacia em uma condição particular de chuva constante no espaço e no tempo, podendo ter aplicações como chuvas intensas para projeto de obras de engenharia, tais como diques, barragens e pontes, ou para avaliação de eventos ambientais extremos.

O método da variação temporal da chuva é possível a partir da inserção de uma série histórica de chuva, geralmente oriunda de dados medidos em estações pluviométricas, fazendo-a variar no tempo. Com ela é possível avaliar o comportamento hidrológico de longo prazo de uma bacia percebendo o quanto a sazonalidade da chuva influencia nas demais variáveis hidrológicas e o tempo de respostas da bacia ao aumento ou diminuição das chuvas. Este método tende a ser mais eficaz em bacias pequenas onde é verificada a homogeneidade dos eventos de precipitação e, não representando bem bacias extensas, pois a variação espacial da chuva implica em grandes variações

do comportamento hidrológico. O modelo permite a utilização dos métodos de interpolação *Triangulated Irregular Networks* (TIN) e *Inverse Distance Weighting* (IDW), para que as séries históricas medidas nas estações, que estão dispersas na bacia, possam ser usadas para estimar os valores de precipitação entre as estações. No entanto, para bacias muito grandes, isso pode significar grandes desvios, especialmente se a densidade de estações for baixa.

A variação espacial e temporal das chuvas é possível a partir da inserção do arquivo hierarquizado do tipo *Hierarchical Data Format Version 5* (HDF5), bastante utilizado em computação científica, pois é um formato de arquivos criado para organizar e armazenar uma grande quantidade de dados, geralmente criado a partir de dados simulados em modelos atmosféricos. Este método permite uma representação especializada da precipitação, que por sua vez implicará em uma melhor representação da vazão, pois admite eventos de chuvas intensas em determinadas áreas de bacia, bem como ausência completa de chuva em outras áreas, sendo a vazão no exutório a resultante destas variações. Tem como ponto negativo a possibilidade de propagação de erros entre os modelos, uma vez que superestimar a chuva no modelo atmosférico implica em superestimar a vazão no modelo hidrológico.

Tendo em vista a necessidade da modelagem hidrológica da bacia com grande extensão, como o caso da Bacia do Rio Paraíba do Sul (62.074 km²), este trabalho busca propor a integração entre o modelo atmosférico *Weather Research and Forecast* (WRF) ao modelo hidrológico MOHID *Land* de forma a se obter a melhor representatividade das variáveis atmosféricas, notadamente os eventos de precipitação, que representa o maior contribuinte às variações de vazão no estudo hidrológico da bacia, buscando um melhor ajuste no modelo hidrológico. Outras variáveis atmosféricas, tais como, direção e velocidade dos ventos, umidade relativa, radiação solar e temperatura do ar, são variáveis que servem de entrada para o modelo hidrológico e são possíveis de simular no WRF-ARW.

Foram elaborados seis cenários de modelagem hidrológica com foco nos valores de vazões, com diferentes entradas de chuva. Quatro cenários foram oriundos das saídas de chuva do modelo WRF e dois cenários correspondente à chuva medida pelas estações oficiais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), e interpolada pelos métodos, TIN e IDW, respectivamente. Após a simulação, os resultados foram comparados com os dados medidos na estação fluviométrica da Agência Nacional de Águas (ANA), em Campos dos Goytacazes, e submetidos aos testes estatísticos de viés (BIAS), *Mean Absolute Error* (MAE), *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), *Root Mean Square Error* (RMSE) e Correlação de Pearson (R), para avaliação de qual método de entrada de chuva melhor representou a vazão na Bacia do Rio Paraíba do Sul.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo: Bacia do Rio Paraíba do Sul

A metodologia desenvolvida é avaliada por meio de um estudo de caso na bacia do Rio Paraíba do Sul, que possui área de aproximadamente 62.074 km² estendendo-se pelos estados de São Paulo (14.510 km²), Rio de Janeiro (26.851 km²) e Minas Gerais (20.713 km²), além de abranger 184 municípios, dos quais 88 em Minas Gerais, 57 no estado do Rio e 39 no estado de São Paulo. No que se refere à área no Rio de Janeiro, a bacia abrange 63% da área total do estado; em São Paulo, 5% e em Minas Gerais, apenas 4%. O ponto de maior altitude é o Pico das Agulhas Negras de 2.787 metros. (CEIVAP, 2019).

Localizada na região sudeste, tal como mostrado na Figura 1, a bacia se encontra em local de forte adensamento populacional, que segundo dados do último censo, estimados em 5,5 milhões de pessoas vivendo no interior da bacia e mais 8,7 milhões de pessoas da zona metropolitana do Rio de Janeiro, que fazem uso de suas águas por meio de transposições. Neste sentido são estimadas 14,2 milhões de pessoas atendidas por esta bacia, nos 184 municípios (CEIVAP, 2019).

Em uma área antes coberta pelo bioma Mata Atlântica, é atualmente intensamente modificada para ocupação humana. É um dos *hotspots* brasileiros e estima-se que possui somente 11% da floresta nativa original (COHIDRO, 2014).

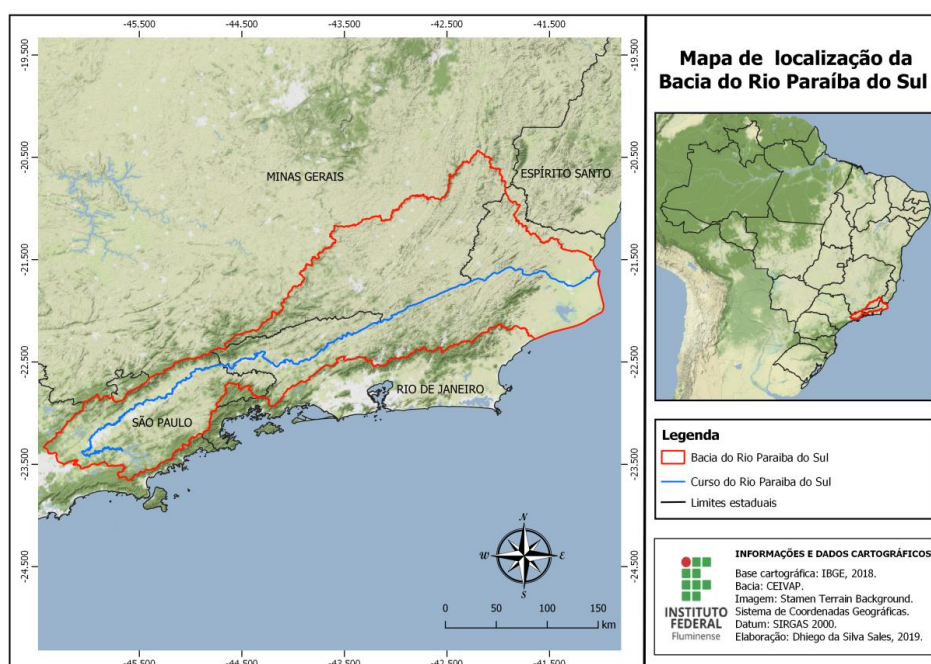


Figura 1 – Mapa de localização da Bacia do Rio Paraíba do Sul.

Fonte: Elaborado pelos autores.

2.2. Modelagem atmosférica: Modelo WRF

O WRF é um modelo de domínio público e distribuído gratuitamente pelo *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), dos Estados Unidos, tendo sido resultado de colaborações entre universidades desde o início dos anos 1990. Ele é composto de dois solucionadores dinâmicos que governam as equações da atmosfera, sendo eles WRF-ARW (*WRF Advanced Research*) e WRF-NMM (*Nonhydrostatic Mesoscale Model*). No presente trabalho foi utilizada a versão 4 do WRF-ARW.

A representação da superfície é implementada no modelo por meio de um conjunto de dados globais de variáveis estáticas, tais como, camadas do solo, categoria de uso do solo, altitude do terreno, temperatura média anual do solo, fração mensal de vegetação e albedo mensal disponíveis para download no site do WRF no endereço http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_sources_wps_geog.html. Alguns dos conjuntos de dados estão disponíveis em apenas uma resolução, mas outros são disponibilizados para download em alta ou baixa resolução.

Embora o modelo tenha sido concebido para análises regionais, este possui a flexibilidade de utilização em estudos locais. Para isso, permite múltiplos domínios (aninhamento) para o processo de *downscaling* minimizando erros (WARNER, 2010).

As condições iniciais e de contorno laterais podem ser obtidas de vários modelos globais, tais como: os dados de reanálise do ERA-Interim, *North American Model* (NAM), *Rapid Update Cycle* (RUC), AGRMET (*Agricultural Meteorology from the Air Force Weather Agency – AFWA*), os produtos de análise do modelo de previsão global - GFS (*Global and Forecast System*), entre outros descritos por Wang et al. (2019).

O sistema computacional é composto de dois módulos principais com aplicações como segue:

- i. O módulo WPS (*WRF Pré-processing System*) tem a finalidade de preparar o input para o programa *real.exe* sendo este composto de três aplicações (WANG et al., 2019): (a) *geogrid.exe*: define os domínios e interpola os dados geográficos estáticos, disponibilizados no formato WPS *binary* para os *grids*; (b) *unbrib.exe*: extraí os dados meteorológicos referentes às condições iniciais e de contorno laterais, distribuídos no formato GRIB; (c) *metgrid.exe*: interpola horizontalmente os dados meteorológicos extraídos pelo *ungrib.exe* ao *grid* definido pelo *geogrid.exe*.
- ii. O módulo WRF está dividido em dois programas. O primeiro é o *real.exe*, que realiza uma interpolação vertical dos dados atmosféricos, interpolados horizontalmente pelo *metgrid.exe*, concluindo assim a etapa de pré-processamento. O último programa a ser

executado é o *wrf.exe* que é responsável por utilizar todos os dados preparados nos programas anteriores, realizando a simulação a partir da definição das parametrizações físicas informadas no arquivo *namelist.input* (WANG et al., 2019). Todas as variáveis simuladas são organizadas em um arquivo hierarquizado no formato padrão do WRF, tipo netCDF, onde é possível organizar um grande número de variáveis em um igualmente grande número de camadas de tempo.

Atualmente os modelos atmosféricos de uma forma geral são executados a partir de um sofisticado conjunto de parametrizações físicas que buscam considerar processos da física atmosférica de forma cada vez mais detalhada (LIU et al., 2018). Estes esquemas são fórmulas simplificadas no lugar de modelos teóricos complexos para resolver os termos associados aos fluxos turbulentos de momentum, calor e umidade. Estes são componentes importantes dos modelos numéricos e um papel decisivo na determinação do comportamento do modelo (GUNWANI e MOHAN, 2017). O WRF possui sete parametrizações físicas para implementação: microfísica, radiação de ondas longas, radiação de ondas curtas, *cumulus*, camada limite planetária, camada de superfície e modelo da superfície da terra.

- i. A microfísica inclui processos explícitos de vapor de água, nuvem e precipitação.
- ii. Os esquemas de radiação tratam do aquecimento atmosférico devido à divergência de fluxo radiativo e radiação de ondas longas e ondas curtas de superfície para o cálculo de calor do solo.
- iii. O esquema *cumulus* é responsável pelos efeitos sub-grade, convecção e distribuição vertical de umidade e calor.
- iv. Os esquemas de camada superficial calculam as velocidades de atrito e os coeficientes de troca.
- v. Esquemas de superfície terrestre fornecem fluxos de calor e umidade sobre pontos de gelo terrestre e marítimo.
- vi. Esquemas de camada limite planetária são responsáveis pela mistura turbulenta através de toda a coluna da rede (SKAMAROCK et al., 2019).

Cada uma dessas parametrizações possui uma grande variedade de esquemas possíveis e estes podem ser utilizados em associações livres, gerando uma grande quantidade de combinações. A combinação com melhor representatividade dependerá da região de estudo e pode ser obtida por meio de estudos de sensibilidade ou por pesquisa na literatura.

2.2.1. Configuração do modelo WRF

O modelo foi configurado com dois domínios aninhados onde, o domínio externo (d1) é composto de um grid de 62 x 51 células com resolução espacial de $\Delta x = \Delta y = 15$ km, enquanto que o domínio interno (d2) é composto de um *grid* de 123 x 90 células com resolução espacial de $\Delta x = \Delta y = 5$ km. As coordenadas do ponto central dos domínios são $43,52^\circ\text{W} / 22,084^\circ\text{S}$, sendo a disposição do aninhamento construído de forma que a malha mais fina contemple toda a extensão da bacia do Rio Paraíba do Sul. A projeção utilizada foi a de Mercator e o arranjo dos domínios pode ser observado na Figura 2.

O perfil vertical do modelo foi configurado para 35 camadas sigmas a 5000 Pa no topo da atmosfera, fixando-se assim a condição de contorno vertical para integração do modelo. O intervalo de tempo de integração foi de 90 s e a saída do modelo foi configurada para obtenção de dados a cada hora. Os dados estáticos são uma opção padrão de alta resolução fornecida pelo modelo.

As condições iniciais e de contorno laterais para os experimentos foram obtidas do modelo de previsão numérica global, GFS, a partir dos dados de análise fornecidos pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), que dispõe das informações da atmosfera em uma resolução temporal de 6h e uma resolução espacial de $0,25^\circ$.

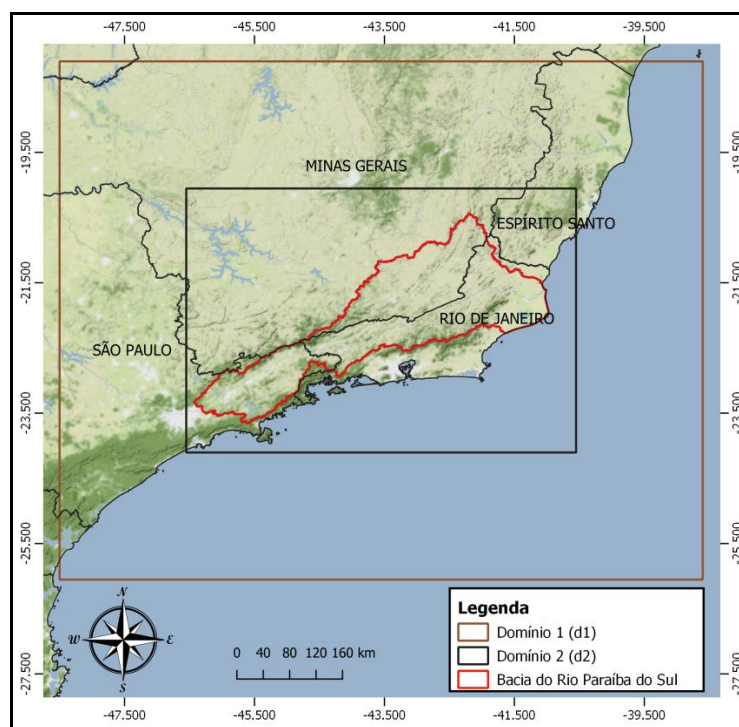


Figura 2 – Arranjo dos domínios para construção do modelo.
Fonte: Elaborado pelos autores.

2.3. Modelagem hidrológica: MOHID *Land*

O MOHID *Land* é um modelo 3D capaz de simular as diferentes fases do ciclo hidrológico, espacialmente distribuído de forma contínua ou variável. O solucionador é de código aberto e livremente distribuído, sendo a sua interface gráfica, o MOHID *Studio*, propriedade da Bentley®. No presente trabalho foi utilizada a versão do MOHID *Studio* 2016, disponibilizada para fins acadêmicos pelo desenvolvedor em parceria com Instituto Federal Fluminense (IFF). A Figura 3 indica as equações resolvidas pela modelo em suas diferentes fases do ciclo hidrológico, onde a rede de drenagem é unidimensional, o escoamento superficial é bidimensional e o processo de infiltração é tridimensional.

O modelo utiliza uma abordagem de volumes finitos, que admite que cada volume de controle (ou célula do *grid*), que é constituído de um volume definido e constante, possui todas as suas propriedades homogêneas e referenciadas no centro de cada célula, sendo o fluxo e velocidade calculados na interface de cada célula (BERNARD-JANNIN et al., 2016). Os processos do MOHID *Land* são baseados na equação de conservação de massa e de continuidade do movimento (IONA, 2013).

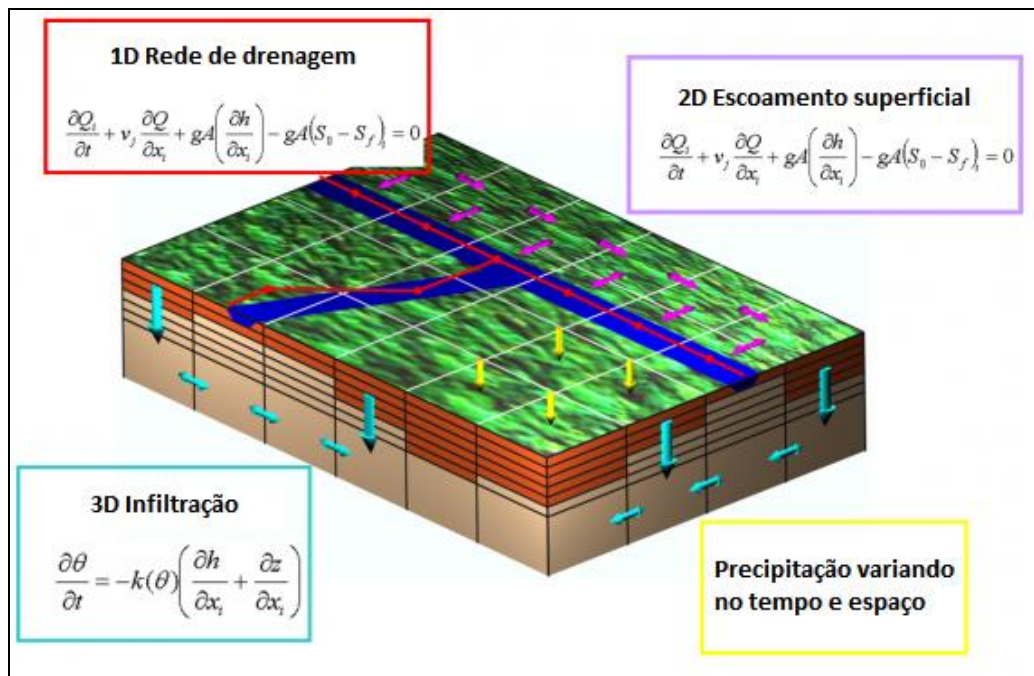


Figura 3 – Sistema de equações resolvido pelo MOHID *Land*, nas diferentes fases do ciclo hidrológico.

Fonte: adaptado de MOHID *Wiki* (2019).

2.3.1. Criação do modelo digital de elevação, delimitação da bacia e rede de drenagem

Para delimitação da bacia e definição da rede de drenagem é necessário implementar no MOHID *Land* informações de altimetria da área de estudo, por meio de um Modelo Digital de Elevação (MDE). Um MDE pode ser definido como um modelo estruturado de linhas e colunas (matriz), georreferenciados, que possui registros altimétricos em cada pixel que compõe a imagem (VALERIANO, 2008).

Os dados de entrada de altimetria foi alimentado a partir de um mosaico de cartas do projeto Topodata, que cobre toda a área de interesse, disponíveis para download no *website* do INPE (<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>) (INPE, 2014). Este MDE é disponibilizado no formato *geotiff* e é um rescalonamento para uma resolução espacial de 30 m, da missão de radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), realizada com o intuito de obter dados de elevação mundiais, originalmente a uma resolução espacial de 90 m. A discretização espacial utilizada no MOHID *Land* foi de $\Delta x = \Delta y = 0,05^\circ$ (~5km) e uma malha de 120 x 81 células de ~5,5km, para geração da topografia.

Após a geração da topografia, foi utilizada a ferramenta *Remove Depression* que consiste na correção matemática das irregularidades do terreno de forma a permitir a criação das linhas de acúmulo de água, que compõem a rede de drenagem do modelo. Em seguida foi utilizada a ferramenta *Delineate Basin* do MOHID *Land*, para o delineamento da bacia e a rede de drenagem. A exatidão do delineamento é sensível à discretização escolhida, que, neste caso, foi de ~5,5 km em virtude do elevado tamanho da Bacia do Rio Paraíba do Sul e uma vez que esta foi a discretização utilizada na simulação de chuvas realizada no modelo atmosférico WRF-ARW. Quanto maior a resolução espacial, maior o custo computacional associado à simulação, devendo desta forma ser avaliada qual resolução espacial atende o fenômeno a ser modelado.

Devido à região do Norte Fluminense do estado do Rio de Janeiro apresentar baixas cotas em alguns casos, cota inferior ao do curso do Rio Paraíba do Sul e ao oceano, optou-se que a bacia modelada no MOHID *Land* desconsiderasse esta grande região de baixada litorânea, uma vez que a precipitação nesta região tende a proporcionar alagamentos e drenagem para outras áreas, que não o Rio Paraíba do Sul. Para tanto o exutório (foz) dessa bacia modelada, foi considerado como sendo nas proximidades do perímetro urbano da cidade de Campos dos Goytacazes, na ponte de ferro municipal, a jusante da foz do rio Muriaé, com a finalidade de concentrar neste ponto o comportamento de toda a bacia a montante, desconsiderando, apenas, a grande planície costeira de Campos dos Goytacazes, a Baixada Campista. Este ponto também coincide com a estação fluviométrica da ANA em Campos dos Goytacazes, para avaliação da exatidão do modelo.

A rede de drenagem é gerada pela ferramenta definindo-se o ponto do exutório e desta forma o algoritmo percorre, em função da altimetria, toda a área delineada gerando a rede de drenagem. Sendo a Bacia do Rio Paraíba do Sul composta por uma complexa rede de drenagem, optou-se pela simplificação da rede de canais para um padrão de hierarquia de canais dentríticos de ordem 3, sendo o curso principal, o Rio Paraíba do Sul. Esta simplificação se faz necessária porque as células que compõem o *grid* são de resolução espacial de ~5,5 km e ainda porque se limita à obtenção de seções transversais para a composição do complexo modelo de toda a bacia. A rede modelada, apesar de simplificada, mostrou-se bastante próxima da realidade, quando comparada com os cursos dos rios presentes no levantamento oficial disponível no site da ANA. A bacia modelada pode ser visualizada na Figura 4.

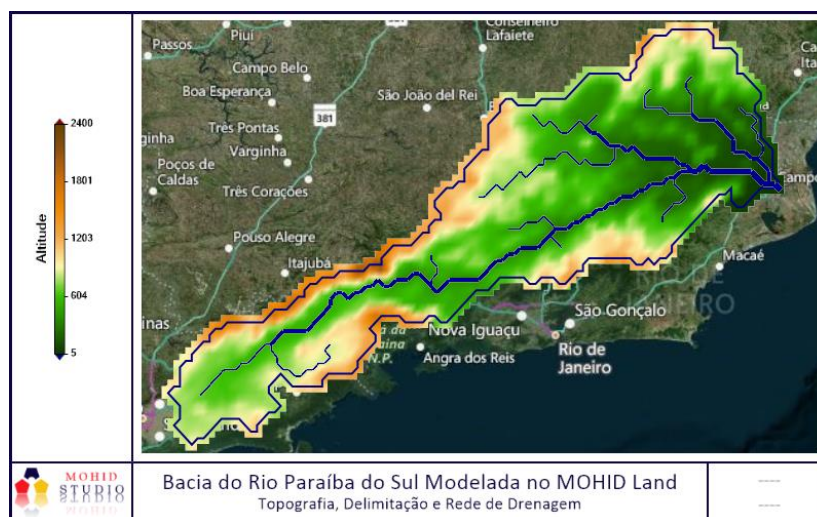


Figura 4 – Bacia do Rio Paraíba do Sul gerada na interface do MOHID Studio.

Fonte: Elaborado pelos autores.

2.3.2. Ajuste das seções transversais

Para o cálculo de vazão, que é obtido por meio do produto da velocidade de fluxo na calha pela área da seção transversal, o MOHID Land requer que sejam implementadas as seções transversais para cada nó da rede de drenagem (LUGON JUNIOR et al, 2017). A geometria padrão da seção transversal é trapezoidal onde é possível implementar uma seção para cada ordem do canal.

As seções transversais implementadas no modelo foram extraídas do banco de dados públicos da ANA, por meio do aplicativo Hidro 1.3, disponível para *download* no portal *HidroWeb* <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/download>. Uma vez que a seção transversal real é irregular, foi estabelecida a área equivalente de cada uma das seções reais e esta convertida na forma geométrica

trapezoidal para inserção no modelo por aproximação, sendo preservadas a profundidade e a largura do rio no local da estação. Foram implementadas onze seções transversais, onde duas são de ordem 3, oito são de ordem 2 e uma de ordem 1. A identificação das estações utilizadas, ordem que cada uma representa no modelo e as dimensões calculadas das seções podem ser observadas na Tabela 1.

Para determinação da seção para cada ordem, foi realizada uma média aritmética entre os valores da base maior, base menor e altura do trapézio. Esta operação pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 1 – Seções transversais da ANA utilizadas para implementação no MOHID *Land*.

ID ANA	Local	Rio	Ordem Modelada	Data da Seção	Área Total (m ²)	Base maior (m)	Base menor (m)	Altura (m)
58920000	Patrocínio do Muriaé	Muriaé	1	26/02/2015	655,89	110,00	21,18	10,00
58235100	Queluz	Paraíba	2	15/03/2014	499,35	78,00	17,11	10,50
58242000	UHE Funil Jusante	Paraíba	2	27/10/2006	659,38	140,00	62,88	6,50
58315100	Vargem Alegre	Paraíba	2	13/07/2018	753,00	190,00	61,00	6,00
58380001	Paraíba do Sul	Paraíba	2	18/03/2015	451,25	75,00	7,05	11,00
58790002	Santo Antônio de Pádua	Pomba	2	03/12/2014	1090,00	180,00	110,67	7,50
58792100	Aperibé	Pomba	2	29/09/2018	937,25	255,00	24,78	6,70
58940000	Itaperuna	Muriaé	2	03/02/2015	686,81	182,20	22,82	6,70
58960000	Cardoso Moreira	Muriaé	2	07/02/2014	905,75	125,00	74,72	9,07
58974000	Campos	Paraíba	3	04/10/2017	1610,00	190,00	102,73	11,00
58880001	São Fidélis	Paraíba	3	17/06/2015	3893,50	460,00	296,02	10,30

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 2 – Seções transversais definidas para cada ordem e implementadas no MOHID *Land*.

Ordem Modelada	Base maior (m)	Base menor (m)	Altura (m)
1	110	21,17	10
2	153,15	47,62	7,99
3	325	199,37	10,65

Fonte: Elaborado pelos autores.

2.3.3. Ajuste do coeficiente de rugosidade

O ajuste do coeficiente de rugosidade de *Manning* é uma das mais importantes variáveis para o cálculo de vazão. Considerando a sua simplicidade e os resultados satisfatórios em aplicações práticas, este tem sido amplamente utilizado em modelagens hidrodinâmicas (LYRA et al., 2010; TAVARES et al., 2019). Sua formulação pode ser observada conforme abaixo,

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R_h^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad (1)$$

onde: Q é a vazão (m³/s), A é a área da seção transversal (m²), n é Coeficiente de *Manning* (s.m^{-1/3}), R_h é o raio hidráulico (m) e S é a declividade (m/m).

Para a calha do rio foi adotado o Coeficiente de *Manning* de 0,035, tal como descrito no trabalho de Tavares et al. (2019). Para a bacia, o coeficiente foi estimado utilizando a metodologia descrita por Chow (1959) combinada com o levantamento de uso do solo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 2016, na escala de 1:250.000, disponível para *download* no *website* ftp://geofpt.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/cobertura_e_uso_da_terra/, onde foram atribuídos valores do coeficiente para cada classe de uso do solo. Todo o recorte e tratamento dos dados foram realizados no *software* de geoprocessamento QGIS 3.8.0. A espacialização do Coeficiente de *Manning* implementado no modelo, bem como, os critérios adotados na estimativa do mesmo, por classe de uso do solo, podem ser observados na Figura 5 e Tabela 3, respectivamente.

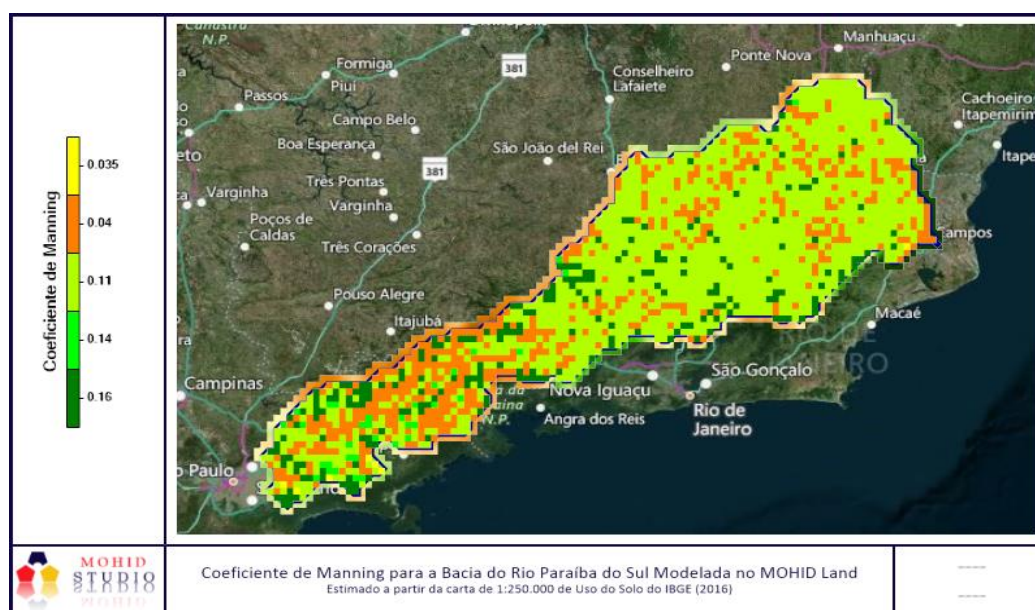


Figura 5: Estimativa do Coeficiente de *Manning* gerado na interface do MOHID *Studio*.
Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 3 – Coeficiente de *Manning* atribuído para cada classe de Uso do Solo do IBGE (2016).

Classe de Uso do Solo IBGE	<i>Manning</i>
Área Artificial	0,04
Área Agrícola	0,04
Pastagem com Manejo	0,04
Mosaico de Ocupações em Área Florestal	0,11
Silvicultura	0,14
Vegetação Florestal	0,16
Vegetação Campestre	0,04
Mosaico de Ocupações em Área Campestre	0,04
Corpo d'Água Continental	0,035

Fonte: Adaptado de Chow (1959).

2.3.4. Ajuste dos processos de infiltração

O MOHID *Land* permite a utilização do módulo *Porous Media*, que tem a finalidade de realizar a modelagem dos fluxos 3D de infiltração e escoamento de subsuperfície, que geram a vazão de base na calha, mediante informações de textura e granulometria de cada solo que compõem a bacia. Conforme Barão et al. (2010) a água contida no solo pode ser transferida em todas as camadas por advecção ou removida por transpiração ou evaporação na superfície, sendo dessa forma gerada a transferência vertical de água até o lençol freático e, por conseguinte, a calha dos rios. Uma vez que para a simulação do processo de infiltração se faz necessário a inserção no modelo das características de todos os solos da extensa Bacia do Rio Paraíba do sul, neste trabalho buscou-se a simplificação desses processos, sendo a infiltração simulada pelo ajuste do método *Curve Number* (CN).

O método CN permite que o MOHID *Land* remove parte da água do escoamento superficial, simulando o processo de infiltração, no entanto, esta parcela de água que corresponde a infiltração, não irá alimentar o lençol freático e, logo, não irá retornar na forma de vazão de base na calha do canal, sendo esta parcela de água retirada do modelo, para ajuste do volume de água escoada superficialmente. O CN é um dos métodos mais simples para calcular a chuva efetiva, ou a parte da precipitação que efetivamente se transforma em escoamento superficial. Este método foi desenvolvido pelo *National Resources Conservation Center* dos EUA (antigo *Soil Conservation Service* — SCS) e é conhecido como SCS-CN (KOWALIK e WALEGA, 2015)

O método é baseado na equação do balanço hídrico e em duas hipóteses. A primeira hipótese afirma que a razão entre o escoamento superficial e o escoamento superficial máximo potencial é

igual à razão entre a infiltração acumulada no solo e a máxima infiltração acumulada potencial. A segunda hipótese afirma que as perdas iniciais correspondem a 20% da máxima infiltração acumulada potencial, só ocorrendo escoamento superficial quando a chuva for maior que a perda. A formulação geral do método SCS-CN pode ser observada abaixo:

$$Q' = \frac{(P - 0.2 \times S')^2}{(P + 0.8 \times S')} \text{ quando } P > I_a \quad (2)$$

$$S' = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

onde: Q' é a chuva efetiva ou escoamento superficial (mm), P é a precipitação ocorrida ao longo do evento (mm), I_a são as perdas iniciais, S' é a máxima infiltração acumulada potencial (mm) e CN é o *Curve Number*.

O CN é um parâmetro adimensional, que varia de 0 a 100, sendo 0 representando um solo com capacidade de infiltração infinita e 100 correspondendo a um solo completamente impermeável (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013). Ele é estimado a partir da análise conjunta da carta de uso do solo e de pedologia, considerando a textura dos solos. Os critérios de CN atribuídos para cada classe de uso do solo foram baseados no trabalho de Cronsheyv (1986), podem ser observados na Tabela 4, e a espacialização do CN implementado no modelo, pode ser observado na Figura 6. Para a textura do solo, convencionou-se o tipo A, onde representa a maior infiltração e D representa o maior escoamento superficial.

Tabela 4 – *Curve Number* atribuído para cada classe de Uso do Solo do IBGE (2016), considerando um solo de textura A.

Classe de Uso do Solo IBGE	<i>Curve Number</i>
Área Artificial	98
Área Agrícola	60
Pastagem com Manejo	39
Mosaico de Ocupações em Área Florestal	45
Silvicultura	45
Vegetação Florestal	30
Vegetação Campestre	39
Mosaico de Ocupações em Área Campestre	39
Corpo d'Água Continental	98

Fonte: Adaptado de Cronsheyv (1986).

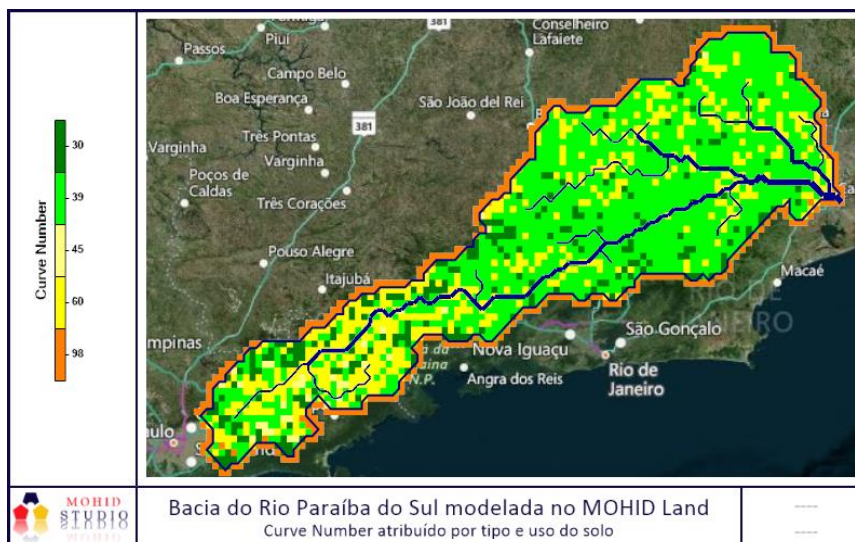


Figura 6 – *Curve Number* implementado na bacia modelada do Rio Paraíba do Sul no MOHID Land.

Fonte: Elaborado pelos autores.

2.3.5. Ajuste da vazão de base

Em razão de simular a vazão de base no canal, pois o fluxo 3D não foi ativado (ver seção 2.3.4), foi atribuída no modelo uma descarga constante em uma célula da rede de drenagem, sendo esta estimada a partir da separação do escoamento do hidrograma de 2018, observado na estação fluviométrica da ANA, em Campos dos Goytacazes, por meio do filtro digital de Chapman.

A água encontrada no subsolo tem sua origem a partir das águas das chuvas que infiltram no solo e percolam até as camadas mais profundas. Em períodos de seca, onde as precipitações declinam, não alimentando os rios por meio de escoamento superficial, a vazão natural de um rio é mantida pelo chamado fluxo de base, que pode ser definido como sendo a contribuição das águas subterrâneas existentes na bacia. Conforme o período seco se estende a água subterrânea vai sendo consumida lentamente em contraposição ao escoamento superficial que é rápido. Este consumo lento proporciona uma redução significativa na vazão dos rios, e pode ser observada por meio do hidrograma de recessão com o comportamento de uma função exponencial decrescente (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013), conforme equação abaixo,

$$Q_t = Q_0 * a \quad (4)$$

$$a = e^{\frac{-t}{k}} \quad (5)$$

Onde: Q_t vazão num instante t ; Q_0 vazão num instante t_0 ; a é o parâmetro exponencial dado por $a = e^{\frac{-t}{k}}$ sendo, k a constante de recessão em dias e t o tempo em dias;

A maior dificuldade associada à determinação do período de recessão é a identificação do início e fim do período, para se realizar então a estimativa da constante de recessão k . Esta pode ser obtida a partir da análise visual da série histórica de vazão medida em um ponto conhecido (NOVAES et al., 2009). Alterações na data de início e de fim promovem alterações no parâmetro e , por sua vez, modificações na exponencial decrescente. A constante de recessão k depende ainda de características físicas da bacia especialmente às suas características geológicas (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013), uma vez que a porosidade e arranjo de subsolo interferem no transporte dessas águas para a calha do rio. Este é dado pela equação abaixo,

$$k = \frac{-\Delta t}{\ln\left(\frac{Q_{(t+\Delta t)}}{Q_t}\right)} \quad (6)$$

onde: Δt é o intervalo em dias entre o fim e início do período de recessão; $Q_{(t+\Delta t)}$ vazão de fim da recessão; Q_t vazão de início de recessão; k é a constante em dias.

A partir da determinação da constante de recessão é possível a estimativa do escoamento de base por meio de filtros digitais. A aplicação de filtros tem como premissa que a vazão é composta por duas componentes, sendo uma delas o escoamento superficial e a segunda o escoamento subterrâneo, conforme enuncia a equação 7. Dentre os vários filtros possíveis disponíveis na literatura, devido à simplicidade de aplicação e por depender apenas da vazão total registrada, foi escolhido o filtro de Chapman (CHAPMAN, 1999, COSTA, 2017; BALBIN-BETANCUR, 2019) que é dado pela equação 8.

$$y_i = f_i + b_i \quad (7)$$

$$b_i = \frac{a}{2-a} * b_{i-1} + \frac{1-a}{2-a} * y_i \quad \text{Se } b_i > y_i \text{ então } b_i = y_i \quad (8)$$

onde: i representa o intervalo de tempo; y é a vazão total do hidrograma no tempo t (m^3/s); f é o escoamento superficial; b é o escoamento subterrâneo; para o valor de a , ver equação 5.

2.3.6. Implementação dos reservatórios

Para a correta representação da variação da vazão, foram implementados no modelo, os reservatórios instalados na bacia. As curvas de operação dos reservatórios, com um histórico de 365 dias, são de domínio público e disponíveis no *website* SIGA-CEIVAP, no endereço <http://sigaceivap.org.br/siga-ceivap/salaDeSituacao>. A Figura 7 representa o esquema com os reservatórios implementados, bem como, sentido de fluxo. A curva de operação para cada reservatório foi gerada tendo sido considerada a diferença entre a vazão defluente (que deixa o reservatório) e vazão afluyente (que chega no reservatório), com o objetivo de se representar a diminuição ou acréscimo de vazão a jusante de cada reservatório em cada instante de tempo, na forma de um ponto de descarga implementada em suas coordenadas.

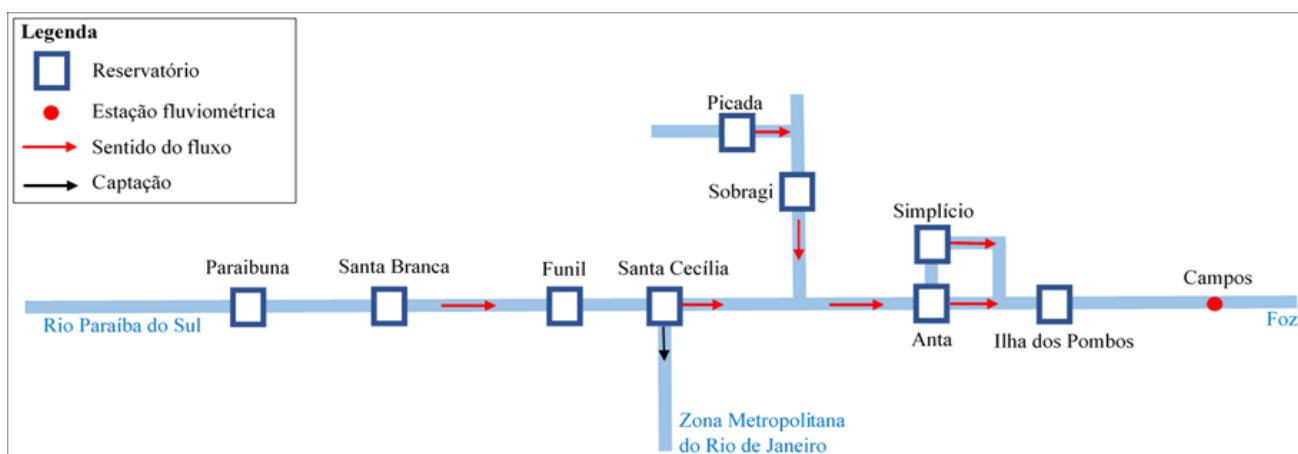


Figura 7 – Representação esquemática com os reservatórios instalados na Bacia do Rio Paraíba do Sul.
Fonte: adaptado de SIGA-CEIVAP (2019).

Foi considerada no modelo a captação referente ao reservatório de Santa Cecília que implica em um decréscimo de vazão considerável no Rio Paraíba do Sul, em virtude do abastecimento da Zona Metropolitana do Rio de Janeiro (ZMRJ). Este é um ponto importante a ser considerado no ajuste do modelo, pois esta captação corresponde ao decréscimo médio na ordem de 30% da vazão total do Rio Paraíba do Sul, sendo esta vazão removida sem retorno para a bacia, uma vez que a ZMRJ não está inserida na Bacia do Rio Paraíba do Sul.

2.4 Cenários de simulação

Para a simulação das vazões na foz do Rio Paraíba do Sul no modelo MOHID *Land*, foram considerados seis diferentes cenários com variação da metodologia de implementação da precipitação: quatro cenários com chuva modelada no WRF-ARW e dois cenários com chuva observada nas estações oficiais do INMET distribuídas na bacia, para avaliação de qual método tem melhor correspondência chuva-vazão. O período de análise escolhido neste trabalho corresponde ao mês de janeiro de 2019 (01/01/2019 00 UTC e 01/02/2019 00 UTC), para avaliação da vazão no período de cheia do rio, onde a incidência de chuva é mais intensa.

2.4.1. Cenários com chuva modelada no WRF-ARW

Tendo em vista às diversas possibilidades de inserção de parametrizações físicas possíveis no modelo WRF-ARW, optou-se pelas parametrizações baseadas no trabalho de Sales et al. (2020), que a partir de testes de sensibilidade de livre associações de sete esquemas de microfísica com sete esquemas *cumulus* (totalizando 49 experimentos), definiu para a região de estudo, quatro combinações de esquemas físicos, estatisticamente semelhantes, e que melhor representam a precipitação média na bacia. Estes são descritos na Tabela 5.

Foram acrescentados ao período original de simulação os dias 30/12/2018 e 31/12/2018 para serem utilizados como *spin-up*, para remoção das instabilidades provenientes no início da simulação.

Tabela 5 – Parametrizações físicas utilizadas no WRF-ARW por experimento.

Experimento	Microfísica	<i>Cumulus</i>	Camada limite Planetária	Camada superficial	Superfície terrestre	Onda longa	Onda Curta
1	Goddard	Grell 3D	MYJ	Esquema de similaridade ETA	<i>Noah land surface model</i>	RRTM	Dudhia
2	WSM5	Grell 3D	MYJ	Esquema de similaridade ETA	<i>Noah land surface model</i>	RRTM	Dudhia
3	Purdue Lin	Grell 3D	MYJ	Esquema de similaridade ETA	<i>Noah land surface model</i>	RRTM	Dudhia
4	WSM5	Grell-Freitas	MYJ	Esquema de similaridade ETA	<i>Noah land surface model</i>	RRTM	Dudhia

Fonte: Adaptado do Artigo 2.

Uma vez que o formato padrão do MOHID *Land* para arquivos hierarquizados é o tipo HDF5 e o modelo WRF-ARW tem como saída o arquivo no formato netCDF, se fez necessária a utilização da ferramenta disponível no modelo hidrológico chamada *ConvertToHdf5*, criada com o objetivo de alocar as variáveis atmosféricas e as camadas de tempo associadas a cada variável, em um formato compatível com a interpretação do MOHID *Land*.

2.4.2. Cenários com chuva medida nas estações oficiais do INMET

Para os dados medidos foram utilizados os dados de precipitação de 17 estações automáticas do INMET, distribuídas na bacia e mostradas na Figura 8. São 19 as estações presentes na bacia, no entanto, as estações de Santa Maria Madalena e Nova Friburgo, ambas no estado do Rio de Janeiro, não possuíam os dados de chuva para a segunda metade do mês de janeiro/2019. Neste sentido optou-se por utilizar apenas as estações que possuíam a série completa de dados. Os dados registrados nestas estações são de domínio público e disponíveis no endereço <http://www.inmet.gov.br/portal/>.

Uma vez obtidos os dados de precipitação para as 17 estações, o MOHID *Land* permite, por meio da ferramenta *FillMatrix*, a interpolação da série histórica dessas estações, de modo a espacializar a chuva. São permitidos dois métodos de interpolação nesta ferramenta, o TIN e o IDW, sendo implementados no modelo os dois, no sentido de verificar, qual apresentou maiores desvios. A premissa empregada pelo algoritmo pressupõe a estimativa dos valores de precipitação entre as coordenadas das estações por meio dos métodos de interpolação. Neste sentido, constitui-se uma variação temporal, com os valores horários disponíveis, e uma estimativa dos valores entre as estações para a variação espacial.

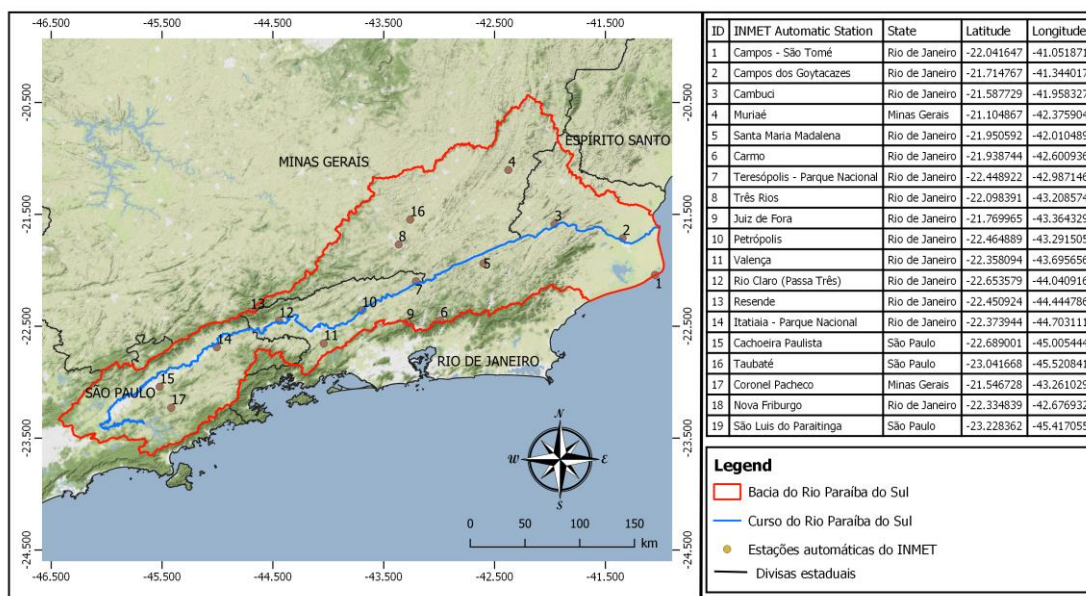


Figura 8 – Distribuição das estações automáticas do INMET, com leitura horária, na Bacia do Rio Paraíba do Sul.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A Tabela 6 apresenta o resumo dos cenários implementados no modelo MOHID *Land* para o estudo de vazões.

Tabela 6 – Cenários de chuva proposto para estudo de vazões na foz modelada do Rio Paraíba do Sul.

Cenário	Descrição
1	Chuva modelada no experimento 1 do WRF-ARW
2	Chuva modelada no experimento 2 do WRF-ARW
3	Chuva modelada no experimento 3 do WRF-ARW
4	Chuva modelada no experimento 4 do WRF-ARW
5	Chuva medida nas 17 estações do INMET, interpoladas pelo método IDW
6	Chuva medida nas 17 estações do INMET, interpoladas pelo método TIN

Fonte: Elaborado pelos autores.

2.5. Método de análise

A metodologia de análise se baseia na utilização de testes estatísticos para avaliação do cenário de chuva que melhor represente a vazão na foz da Bacia modelada, que coincide com a localização da estação fluviométrica da ANA, em Campos dos Goytacazes (58974000). Os dados desta estação são de domínio público e disponível para *download* a partir do portal *HidroWeb* (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>).

Foram utilizadas quatro métricas de erro que representam o grau de afastamento entre os valores simulados e os valores observados, acrescido do Coeficiente de Correlação de Pearson, ou R, conforme abaixo:

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Phi_{i,p} - \Phi_{i,obs} \quad (9)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\Phi_{i,p} - \Phi_{i,obs}| \quad (10)$$

$$MAPE = \frac{100\%}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\Phi_{i,p} - \Phi_{i,obs}}{\Phi_{i,obs}} \right| \quad (11)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Phi_{i,p} - \Phi_{i,obs})^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (\Phi_{i,p} - \bar{\Phi}_{i,p})(\Phi_{i,obs} - \bar{\Phi}_{i,obs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\Phi_{i,p} - \bar{\Phi}_{i,p})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (\Phi_{i,obs} - \bar{\Phi}_{i,obs})^2}} \quad (13)$$

onde: $\Phi_{i,p}$ representa os valores preditos, $\Phi_{i,obs}$ representa os valores observados na estação fluviométrica da ANA e N representa o número de observações, no caso do presente estudo N=745, referente a 31 dias de simulação com dados horários de simulação acrescida da condição inicial.

O BIAS (viés) representa a distância entre a vazão simulada em relação às observações, onde valores positivos implicam que o modelo tende a superestimar os valores observados, enquanto negativos implicam que o modelo tende a subestimá-los. O MAE (*Mean Absolute Error*) representa o desvio médio absoluto da vazão simulada em relação às observações. O MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) representa em termos percentuais o desvio entre a vazão simulada e modelada. O RMSE (*Root Mean Squared Error*) é uma medida da magnitude do erro médio entre os valores simulados e observados, representando o desvio padrão das diferenças, medida esta amplamente utilizada em testes estatísticos em modelos. Para todas as medidas de erro os melhores valores são representados por sua proximidade ao zero, que indicam um menor distanciamento entre os valores simulados e observados, o que implica em um melhor ajuste.

Com o objetivo de verificar o comportamento da curva de vazão modelada em relação à curva de vazão observada foi utilizado o Coeficiente de Correlação de Pearson, ou R. Este representa uma dependência linear entre duas variáveis sendo os valores compreendidos entre -1 e 1. O sinal indica a direção, ou seja, se a correlação é positiva (direta) ou negativa (inversa). A interpretação (em módulo) do coeficiente de Pearson pode ser observada na Tabela 7.

Tabela 7 – Interpretação do coeficiente de correlação.

Coeficiente de correlação (absoluto)	Interpretação
0,00–0,10	Correlação insignificante
0,10–0,39	Baixa correlação
0,40–0,69	Correlação moderada
0,70–0,89	Forte correlação
0,90–1,00	Correlação muito alta

Fonte: adaptado de Schober (2018)

Todos os testes estatísticos foram realizados no *software* RStudio v.1.2.1335 (RSTUDIO, 2019).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Definição da vazão de base por meio do filtro de Chapman

A partir da análise visual do hidrograma de vazão da estação fluviométrica de Campos dos Goytacazes, para 2018, foram estabelecidas as datas de início e fim do período de recessão como sendo 15 de agosto de 2018 (vazão registrada de 239,58 m³/s) e 15 de setembro de 2018 (vazão registrada de 164,98 m³/s), respectivamente, sendo a segunda a menor vazão registrada no ano. Estas datas foram utilizadas para a aplicação das Eqs. (4-6), item 2.3.4. Uma vez estabelecido o valor da constante k, foi construída a série ajustada sendo o desempenho da curva de recessão calculada observada na Figura 9.

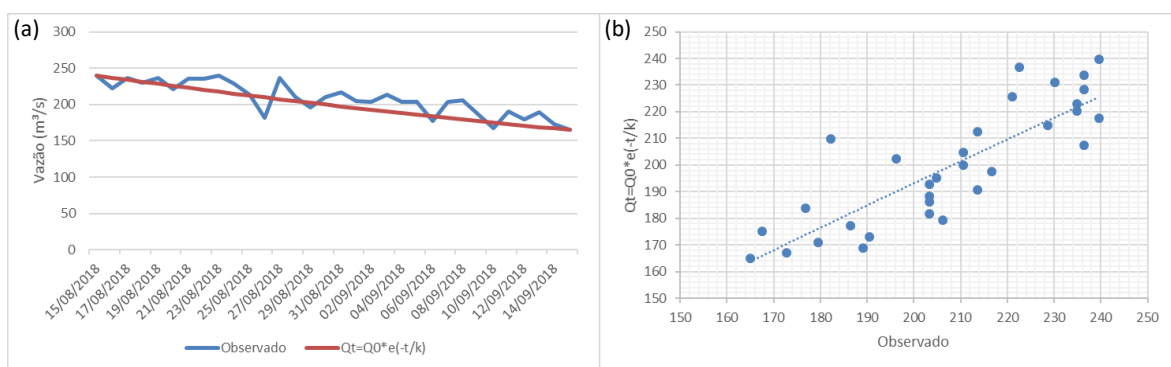


Figura 9 – Desempenho da curva de recessão para a Bacia do Paraíba do Sul a partir da estimativa da constante de recessão k. (a) Comparação Observado x Ajustado pela equação de recessão. (b) Dispersão dos pontos Observado x Ajustado pela equação de recessão.

Fonte: Elaborado pelos autores.

O ajuste proporcionado pela curva exponencial decrescente, calculado a partir da combinação entre as Eqs. (4-6), apresentou coeficiente de correlação $R=0,84$, valor este superior ao encontrado no trabalho de Balbin-Betancur (2019), que encontrou coeficiente de correlação $R=0,63 \pm 0,12$ para um grupo de bacias com características fisiográficas distintas, indicando que a curva de recessão calculada neste trabalho tem forte correlação com os dados medidos, sendo assim, estabelecido o coeficiente de recessão k.

Tendo estabelecido a constante de recessão k e, por conseguinte, o parâmetro α descrito na equação 4, foi aplicado o Filtro digital de Chapman (CHAPMAN, 1999, COSTA, 2017; BALBIN-BETANCUR, 2019), amplamente utilizado em estudos hidrológicos, para a estimativa do fluxo de base a partir do dia 15 de setembro de 2018, que foi o dia com o menor valor de vazão medida em 2018 (164,98 m³/s). O resultado da aplicação do filtro pode ser observado na figura 10.

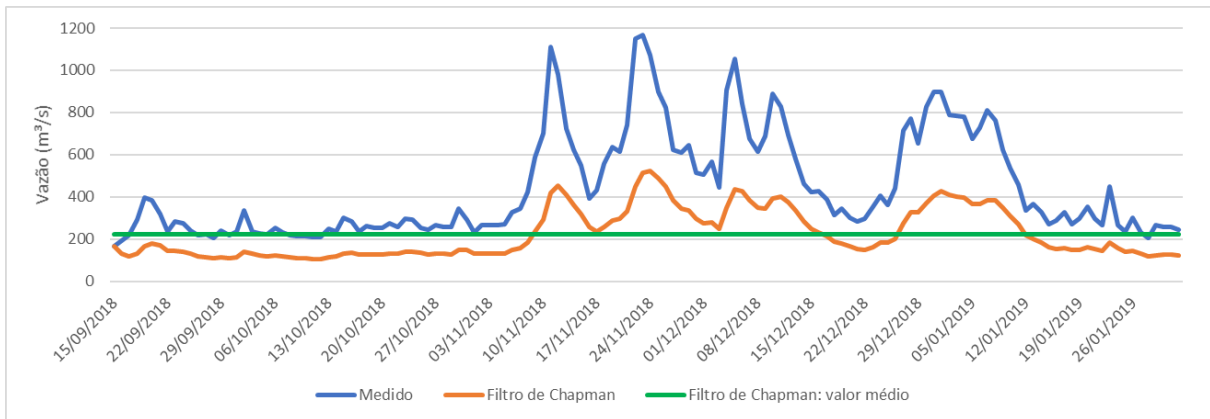


Figura 10 – Separação do escoamento do hidrograma de vazão observada com a representação da vazão de base pelo Filtro de Chapman.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Baseado na série de vazão de base calculada pelo Filtro de Chapman, representado graficamente pela figura 10, foi aplicado ao modelo hidrológico, para todos os cenários, o valor de 224,21 m³/s, sendo este oriundo da média do escoamento de base calculado.

3.2. Simulação de vazão com os cenários de chuva propostos

A modelagem hidrológica da Bacia do Rio Paraíba do Sul foi realizada no modelo MOHID *Land* em seis cenários, com variação de entrada de chuva, conforme descrito na Tabela 6. Foi adicionado um período de simulação de três meses (outubro a dezembro de 2018), que foi utilizado como *spin-up* do modelo hidrológico, com a finalidade de remoção das instabilidades de início de simulação. Para este período foi utilizada uma chuva constante no tempo e no espaço de 1,5 mm/h, que constituiu ainda, a vazão inicial para o período de interesse.

Foram propostas duas análises, uma quantitativa por meio da avaliação estatística e outra qualitativa por meio da análise das curvas. Os resultados estatísticos obtidos através da aplicação das métricas, podem ser observados na Tabela 8.

O teste estatístico de BIAS, destinado à indicação de superestimação ou subestimação dos resultados, indicou que apenas nos cenários 4 e 6 o modelo tendeu a superestimar a vazão medida, em todos os outros subestimou. Oliveira (2006), ao analisar a vazão pelo acoplamento do WRF-ARW ao modelo hidrológico TOPMODEL, na Bacia União da Vitória/PR, identificou comportamento divergente, no sentido de que os dados foram superestimados, valendo destacar que o autor estabeleceu apenas uma parametrização física ao WRF, limitando o comportamento da

precipitação a apenas um cenário dos inúmeros possíveis. Santos (2016), em um estudo na Bacia do Rio Paraíba do Meio/AL, observou tendência similar ao presente trabalho no sentido de subestimar a vazão no modelo hidrológico SCS/HMS, com dados de chuva oriundos do WRF-ARW, tendo sido feita pelo autor uma proposta de associações de parâmetros físicos de três microfísicas e três *cumulus*. Os resultados indicam que a tendência de superestimar ou subestimar a vazão tem relação direta com a entrada de chuva adotada, evidenciando uma necessidade de execução de teste de sensibilidade de parâmetros físicos no modelo atmosférico WRF-ARW, para a correta representação da precipitação, que sofre influência direta da latitude e altitude.

Tabela 8 – Resultados dos testes estatísticos realizados por cenário de análise.

Simulações modeladas no MOHID	BIAS	MAE	MAPE	RMSE	R
Cenário 1: Vazão observada x modelada (chuva modelada no WRF - Experimento 1)	-29,31	133,93	0,33	171,84	0,76
Cenário 2: Vazão observada x modelada (chuva modelada no WRF - Experimento 2)	-87,17*	96,97*	0,25*	119,31*	0,90*
Cenário 3: Vazão observada x modelada (chuva modelada no WRF - Experimento 3)	-85,67	98,86	0,26	123,35	0,87
Cenário 4: Vazão observada x modelada (chuva modelada no WRF - Experimento 4)	540,76	556,30	1,54	616,49	0,58
Cenário 5: Vazão observada x modelada (chuva medida interpolada pelo método IDW)	-140,94	150,03	0,38	175,67	0,80
Cenário 6: Vazão observada x modelada (chuva medida interpolada pelo método TIN)	0,65	157,40	0,36	264,28	0,67

* Melhores resultados,

Fonte: Elaborado pelos autores,

Para avaliação do comportamento das curvas ou sua variabilidade, foi utilizado o Coeficiente de Correlação de Pearson. Considerando a interpretação descrita na Tabela 7, observou-se que apenas o cenário 2 apresentou correlação muito forte representando o resultado com melhor desempenho. Como avaliação de desempenho, é possível comparar com os resultados obtidos por Santos (2016), que obteve em duas suas sub-bacias no estado de Alagoas, valores de $R=0,75$ e $0,76$ e também como o trabalho de Rodrigues (2012), que para os mesmos pontos estudados por Santos (2016), obteve resultados de $R=0,42$ e $0,55$. Os cenários 3, 5 e 1, apresentaram uma forte correlação e nessa ordem o melhor desempenho. Os cenários 4 e 6 apresentaram uma correlação moderada, sendo o 4 de pior desempenho. Vale destacar, que apenas a análise do Coeficiente de Correlação de Pearson não indica o melhor desempenho do modelo, pois as curvas podem seguir o mesmo padrão e, portanto, possuir uma baixa variabilidade, mas os desvios podem ser grandes, sendo dessa forma necessário, associá-las ao menor erro.

O RMSE, que é amplamente utilizado para testes de modelos e indica a magnitude do erro, apresentou os cenários 2, 3, 5, 1, 6 e 4, em ordem decrescente de menor desvio e, portanto, com o

melhor desempenho. Quando analisados conjuntamente os testes de MAE, MAPE e RMSE, foi possível observar que o menor desvio permanece no cenário 2, oriundo da chuva modelada no WRF-ARW, sendo assim entendido que este foi o cenário que produziu o menor desvio, quando se analisa os erros totais no período de análise.

Associando todos os testes estatísticos considerados foi possível observar que o cenário 2, foi o de melhor desempenho seguido do cenário 3, sendo ambos oriundos do modelo WRF-ARW, e validando a hipótese do presente trabalho, de que para grandes bacias é mais adequada a variação espacial e temporal das chuvas para alimentar os dados de precipitação em modelos hidrológicos. Foi possível ainda constatar, que a variação nas parametrizações físicas no modelo atmosférico (vide Tabela 5) apresentam grandes variações na resposta hidrológica da bacia. Neste sentido recomenda-se teste de sensibilidade para parametrizações físicas da precipitação simuladas em modelos atmosféricos, antes da implementação desta em modelos hidrológicos, e posteriormente teste dentre as parametrizações físicas de melhor desempenho, para avaliação de qual tem melhor correspondência hidrológica.

Sendo consideradas apenas as vazões oriundas das entradas de precipitação interpoladas, foi possível observar que o método IDW, respondeu melhor estaticamente à variação da vazão na calha do rio que o TIN, indicando que este método tende a ter melhor desempenho para interpolação de chuva e posterior implementação no modelo hidrológico. No entanto, ambos proporcionam maiores desvios do que a chuva modelada no WRF-ARW.

A Figura 11 apresenta as curvas geradas para cada uma das simulações de vazão e contribuem para uma avaliação qualitativa dos cenários de análise.

A curva da vazão medida indica que os primeiros 10 dias do mês de janeiro de 2019 resultaram em maiores valores de vazão, devido à maior incidência de precipitação, uma vez que a vazão do canal em eventos de pico de vazão é oriundo majoritariamente do escoamento superficial. Todos os cenários captaram a elevação de vazão neste período, bem como o início da recessão, sendo que os cenários 1, 4 e 6 promoveram grandes picos de vazão entre os dias 05/01 e 06/01. A explicação deste fato, nos casos 1 e 4, pode estar relacionada com o erro na percepção e distribuição da chuva pelo modelo WRF-ARW, concentrando precipitação em pontos da bacia, o que promove uma superestimação no escoamento superficial. No caso do cenário 6 pode estar vinculado ao método de interpolação, uma vez que o TIN concentra em determinados pontos os valores triangulados das estações próximas, neste sentido, a chuva pode ter sido concentrada em um ponto pelo método, promovendo uma superestimação pontual, logo aumentando o escoamento superficial.

Quando é observado o comportamento das curvas referente aos dados interpolados, verifica-se que o pico do IDW esteve na mesma ordem de grandeza dos dados medidos, respondendo melhor

nesta condição quando comparado com o TIN. Em condições de baixa pluviosidade na bacia as curvas tendem a ser mais próximas para o TIN que o IDW.

Sendo a chuva a variável que mais influencia nas previsões hidrológicas, principalmente nas médias e grandes bacias (RODRIGUES, 2012), sua correta representação tem contribuição decisiva em estudos hidrológicos. Estudos realizados por Paiva (2011) e Rodrigues (2012) concluem que dados de chuva medidos são mais eficientes que dados modelados no WRF-ARW, apesar de reconhecerem problemas de inicialização do modelo, podendo ser citada ainda a utilização inadequada de parametrizações físicas, que não respondem satisfatoriamente às condições particulares de cada região.

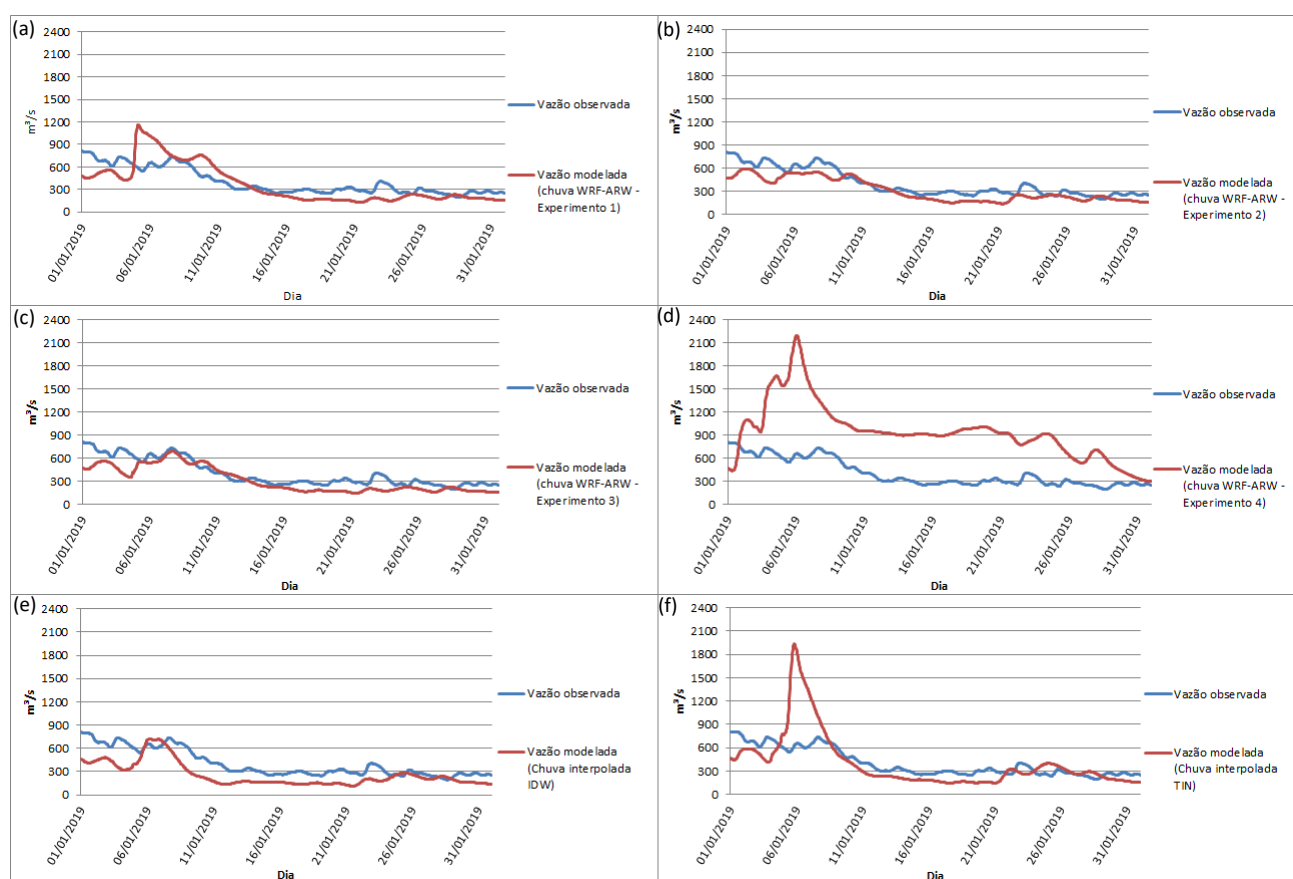


Figura 11 – Resultado de vazão calculada x vazão observada para os diferentes cenários.

- (a) Hidrograma do Cenário 1: Vazão observada x modelada (chuva modelada no WRF-ARW com o experimento 1).
- (b) Hidrograma do Cenário 2: Vazão observada x modelada (chuva modelada no WRF-ARW com o experimento 2).
- (c) Hidrograma do Cenário 3: Vazão observada x modelada (chuva modelada no WRF-ARW com o experimento 4).
- (d) Hidrograma do Cenário 3: Vazão observada x modelada (chuva modelada no WRF-ARW com o experimento 4).
- (e) Hidrograma do Cenário 5: Vazão observada x modelada (dados de chuva medidos nas estações automáticas do INMET e interpolada pelo método IDW).
- (f) Hidrograma do Cenário 6: Vazão observada x modelada (dados de chuva medidos nas estações automáticas do INMET e interpolada pelo método TIN).

4. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo realizar a modelagem hidrológica do Rio Paraíba do Sul com foco na avaliação da metodologia de implementação dos dados de chuva no modelo hidrológico MOHID *Land*, que melhor representou a variação da vazão na foz do Rio Paraíba do Sul.

A partir dos dados obtidos foi possível observar que a chuva modelada no modelo atmosférico WRF-ARW, ou seja, com variação espacial e temporal em uma malha discretizada, resultou em um melhor ajuste para modelagem da vazão quando comparado com a implementação de chuvas a partir de dados reais, porém dispersos espacialmente, oriundos da leitura de estações pluviométricas oficiais interpolados tanto no método IDW quanto TIN.

Foi possível observar que as quatro parametrizações físicas de melhor desempenho do modelo WRF-ARW para a bacia em estudo, observadas no trabalho de Sales et al. (2020), que apesar de terem sido consideradas semelhantes estatisticamente, resultaram em uma variação significativa na resposta hidrológica. A parametrização física do modelo WRF-ARW que obteve o melhor desempenho na representação da precipitação média na bacia, bem como, na representação hidrológica para a Bacia do Rio Paraíba do Sul foram os esquemas de microfísica WSM5 e convectivo Grell 3d, seguidos dos esquemas de microfísica de Purdue Lin e convectivo Grell 3d. Estes foram associados ao MYJ, Esquema de similaridade ETA, NOAH, RRTM e Dubhia, para os esquemas de camada limite planetária, camada superficial, superfície terrestre, radiação de ondas longas e radiação de ondas curtas, respectivamente.

Quando analisados somente os métodos de interpolação, foi possível observar que o IDW, apresentou o menor desvio, indicando que no caso de não se obter acesso a uma modelagem atmosférica, este método representou melhor a chuva na bacia e, em seguida, a vazão na calha do rio.

Por fim foi possível observar pelos testes estatísticos e análise dos hidrogramas, que o modelo hidrológico construído neste trabalho respondeu satisfatoriamente para o mês de janeiro de 2019 a representação da vazão na bacia, tendo resposta estatística melhor do que os trabalhos de Oliveira (2006), Rodrigues (2012) e Santos (2016), que apesar de realizarem estudos em bacias diferentes, utilizaram a chuva do WRF-ARW como entrada nos modelos hidrológicos de seus estudos.

Ficam como recomendações para trabalhos futuros:

- Utilizar uma série de vazões mais longa para verificação do comportamento hidrológico da bacia em períodos de cheia e vazante;
- Segmentar a bacia em sub-bacias de forma a avaliar o comportamento em unidades distintas;

- Calibrar os coeficientes referentes ao solo e ativar o fluxo 3d no modelo, para que associada a uma simulação de longo prazo o fluxo de base seja variável no tempo pelo modelo, sem a necessidade de abstrações provenientes de filtros digitais;
- Diminuir a resolução espacial da malha e aumentar a hierarquia da rede de canais com dados de seções transversais medidas, para um melhor ajuste.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA) [Internet]. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos, Portal HidroWeb. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb>. Acesso em: 5 de novembro de 2019.

BALBIN-BETANCUR, S. Contribuição do fluxo de base na vazão de rios em áreas tropicais com alto índice pluviométrico: uma análise para a bacia do Rio Atrato, 124p, 2019. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente). Instituto de Geociências e Ciências Exatas Campus de Rio Claro: UNESP: Rio Claro.

BARÃO, L.; LEITÃO, P. C.; BRAUNSCHWEIG, F.; NEVES, R. J.; GONÇALVES, M. C.; RAMOS, T. B.; CASTANHEIRA, N. L. Simulation of water dynamics in two irrigated soils. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 33, p346-357, 2010. Retrieved January 13, 2020, from http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0871-018X2010000100037&lng=en&tlng=en.

BERNARD-JANNINA, L.; BRITO, D.; SUN, X.; JAUCH, E.; NEVES, R.; SAUVAGE, S.; SÁNCHEZ-PÉREZA, J. Spatially distributed modelling of surface water-groundwater exchanges during overbank flood events – a case study at the Garonne River. *Advances in Water Resources*, v. 94, p.146-159, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.05.008>.

CEIVAP, 2019. Dados geoambientais [Internet]. Disponível em: www.ceivap.org.br/dados-gerais.php. Acesso em: 30 de dezembro de 2019.

CHAPMAN, Tom. A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. *Hydrological Processes*, v. 13, n. 5, p. 701-714, 1999.

COHIDRO. Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e planos de ação de recursos hídricos das bacias afluentes, r3-b: relatório de diagnóstico. CEIVAP, Rio de Janeiro, 226 p, 2014.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. Porto Alegre: Editora ABRH, 2013

COSTA, F. F. Abordagem distribuída para simulação chuva-vazão em pequenas bacias hidrográficas. 2017. 124p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Centro de tecnologias: UFPB/CT.

CRONSHEY, R. Urban hydrology for small watersheds. US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division, 1986.

CHOW, V. T. Open-channel hydraulics. Caldwell. 1959.

GUNWANI, P.; MOHAN, M. Sensitivity of WRF model estimates to various PBL parameterizations in different climatic zones over India. Atmospheric research, v. 194, p. 43-65, 2017.

INPE [Internet]. Topodata: Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata>. Acesso em: 01 de abril de 2019.

IOANA, P. Modeling Floods In Enxoé Watershed [Dissertação]. IST-Technical University Of Iasi, Roménia, 2013.

KOWALIK, T.; WALEGA, A. Estimation of CN parameter for small agricultural watersheds using asymptotic functions. Water, v. 7, n. 3, p. 939-955, 2015.

LUGON JR., J.; TAVARES, L. P. S.; COSTA, J. B.; KALAS, F. A. Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Macaé utilizando o MOHID Land. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, v. 11, p. 169, 2017.

LYRA, G. B.; CECILIO, R. A.; ZANETTI, S. S.; LYRA, G. B. Coeficiente de rugosidade de Manning para o rio Paracatu. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 14, p.343–350, 2010.

MOHID WIKI [Internet]. MOHID Land. Disponível em: http://wiki.mohid.com/index.php?title=Mohid_Land. Acesso em 31 dezembro, 2019.

NOVAES, L. F.; PRUSKY, F. F.; QUEIROZ, D. O.; RODRIGUES, R. G.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Modelo para a quantificação da disponibilidade hídrica: Parte 1 - Obtenção da equação de recessão. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 14, n. 1, p. 15-26, 2009.

OLIVEIRA, A. C. Implementação do modelo atmosférico WRF acoplado com o modelo hidrológico TOPMODEL para a bacia de União da Vitória, 2006. 70p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná: Curitiba.

RODRIGUES, M. T. Acoplamento do modelo hidrológico MGB ao modelo atmosférico WRF visando estimar vazão na bacia do rio Paraíba do Meio AL/PE. 2012. 101p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Ciências Atmosféricas, UFAL: Alagoas.

RSTUDIO [Internet]. Disponível em: <http://www.rstudio.com/products/rstudio/download/>. Acesso em 10 setembro, 2019.

PAIVA, A, P, O. Avaliação da eficiência do acoplamento de modelos atmosféricos e modelos hidrológicos. 2011. 78p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió.

SALES, D. S., LUGON JR., J., OLIVEIRA, V. P. S., FERREIRA, N. S., SILVA NETO, A. J. Quantitative Evaluation of Atmospheric Phenomena Models for Precipitation Assessment in Hydrologic Studies for the Paraíba do Sul Watershed, Atmospheric Research, (submitted).

SANTOS, A. G. Acoplamento do modelo atmosférico WRF ao modelo hidrológico SCS/HMS para a previsão de cheias na Bacia do Paraíba do Meio em Alagoas. 2016. 132p. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de engenharia Hidráulica e Ambiental, UFC: Ceará.

SCHOBER, P.; BOER, C.; SCHWARTE, L. A. Correlation coefficients: appropriate use and interpretation. *Anesthesia & Analgesia*, v. 126, n. 5, p. 1763-1768, 2018.

SIGA-CEIVAP [Internet]. Sala de situação. Disponível em: <<http://sigaceivap.org.br/sigaceivap/salaDeSituacao>> Acesso em 20 agosto, 2019.

SKAMAROCK, W.; KLEMP, J.; DUDHIA, J.; Gill, D.; BARKER, D.; DUDA, M.; HUANG, X.; WANG, W.; POWERS, J. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4. NCAR Technical Note NCAR/TN-556+STR, 145 pp, 2019 doi:10.5065/1dfh-6p97.

TAVARES, L. P. S.; LUGON JR., J.; RODRIGUES, P. P. W.; KALAS, F. A.; WASSERMAN, J. C. Reservoir Implantation for Flood Dampening in the Macaé River Basin Using the MOHID Land Model. *CIÊNCIA E NATURA*, v. 41, p. 1-10, 2019.

TUCCI, C.E.M. Hidrologia: Ciência e aplicação. 3 ed. Porto Alegre, ABRH. 2004.

VALERIANO, M. M. Topodata: Guia para utilização de dados geomorfológicos locais do projeto de produtividade em pesquisa modelagem de dados topográficos SRTM, INPE: São José dos Campos, Brasil, 2008.

WANG, W.; BRUYERE, C.; DUDA, M.; DUDHIA, J.; GILL, D.; LIN, H.-C.; MICHALAKES, J.; RIZVI, S.; ZHANG, X.; BEEZLEY, J. D.; COEN, J. L.; KAVULICH, M.; WERNER, K.; CHEN, M.; BERNER, J.; MUNOZ-ESPARZA, D.; REEN, B.; FOSSEL, K.; MANDEL, J. ARW Version 4 Modeling System User's Guide, Mesoscale & Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, 2019.

WARNER, T. T. Numerical weather and climate prediction. Cambridge University Press, 2010.