



Á

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Instituto de Geociências/Programa de Pós-Graduação em Geografia

Lilian Aline Machado

***ANÁLISE DAS RELAÇÕES SUPERFÍCIE-ATMOSFERA NA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS EM UMA
PERSPECTIVA MULTIESCALAR: PROPOSTA DE SÍNTESE***

Belo Horizonte

2021Á

Á

Lilian Aline Machado

***ANÁLISE DAS RELAÇÕES SUPERFÍCIE-ATMOSFERA NA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS EM UMA
PERSPECTIVA MULTIESCALAR: PROPOSTA DE SÍNTESE***

Trabalho apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Geografia.

Área de Concentração: Análise Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Wellington Lopes Assis

Belo Horizonte

2021

M149a Machado, Lilian Aline.
2021 Análise das relações superfície-atmosfera na bacia hidrográfica do Rio das Velhas em uma perspectiva multiescalar [manuscrito] : proposta de síntese / Lilian Aline Machado. – 2021.
218 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Wellington Lopes Assis.
Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Geografia, 2021.

Área de concentração: Análise Ambiental.

Bibliografia: f. 164-174.

Inclui apêndices.

1. Climatologia – Teses. 2. Bacias hidrográficas – Minas Gerais – Teses. 3. Velhas, Rio das (MG) – Teses. I. Assis, Wellington Lopes. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Geografia. III. Título.

CDU: 551.58(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
COLEGIADO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
COLEGIADO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Tese de Doutorado defendida e aprovada, no dia ... , pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

- USP

UFJF

- UFV

IGC/UFMG

‡ Orientador
IGC/UFMG

Belo Horizonte, 01 de julho de 2021.



Documento assinado eletronicamente por - 8 , y - , em 26/07/2021, às 14:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por # # U 7 , y - , em 26/07/2021, às 15:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por - o 7 , y - , em 26/07/2021, às 15:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por # = K , h U o , em 26/07/2021, às 18:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por ‡ O ° , h U o , em 26/07/2021, às 20:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador e o código CRC)) 7#° ° .

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. Wellington Lopes Assis pela orientação paciente e firme, principalmente em tempos difíceis de pandemia e isolamento social onde foi mais do que um instrutor da pesquisa, mas foi um bom ouvinte e aconselhador, quase um psicólogo.

- Ao Prof. Carlos Henrique Jardim pelo incentivo à carreira acadêmica e com quem as conversas são sempre inspiradoras.

- A meu pai, Erotides, minha mãe, Elena, minha irmã, Lidiane, meu sobrinho, Henrique, e meu cunhado, Elvis, pelo incentivo e paciência com as ausências constantes.

- Ao Marcelo Lois, meu amigo, revisor de tese, parceiro de trilha, grande incentivador dos meus projetos e marido.

- À Amanda Ribeiro, Rômulo Machado e Isabella Lorenzini que, além de grandes amigos e apoiadores dos meus projetos, trabalharam ativamente na revisão deste texto.

- À equipe do Centro de Sensoriamento Remoto da UFMG com os quais trabalhei durante quase todo o período do doutorado e que tanto me ajudaram com ideias e a execução dos modelos cartográficos desenvolvidos na pesquisa. Especialmente agradeço ao Ubirajara Oliveira pela orientação no desenvolvimento de algumas etapas da metodologia, ao William pela ajuda na construção de modelos e ao Prof. Dr. Britaldo Soares-Filho pela oportunidade que me foi dada no laboratório.

- Aos meus colegas da pós-graduação que enfrentaram esta jornada junto a mim e compartilharam desafios ao longo do curso, especialmente à Débora Assis com quem dividia o espaço de trabalho, o objeto de estudo, e todas as aflições de cada etapa desse doutorado.

- À UFMG pela acolhida nesses 11 anos de discente. A importância da universidade pública na minha vida é imensurável. Hoje a UFMG para mim é mais do que uma escola, mas uma referência e um lar.

- Aos meus parceiros de trilha que, sem saber, estavam participando dos meus trabalhos de campo.

Num espectro de temáticas tão variado quanto o da Geografia aquela da Climatologia (como a Geomorfologia, Hidrografia, Geografia Agrária, Urbana, Econômica e todas as possíveis subdivisões disciplinares) poderá (e merece) despertar o interesse como campo eleitoral preferencial. Mas sem que jamais seja perdido o seu vínculo indispensável a manter o caráter unitário e conjuntivo da Geografia. A meu ver uma “virtude” que é vital a Geografia, em suas inevitáveis e fatais mutações ao longo dos tempos.”

Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro, 1999.

RESUMO

A bacia hidrográfica do Rio das Velhas consiste em uma das principais sub-bacias do rio São Francisco, abrigo em seu território a capital do estado de Minas Gerais e sua região metropolitana (RMBH). Por drenar a região mais industrializada e densamente povoada do estado, os trechos da bacia próximos à RMBH passam por um crescente processo de degradação, que também se manifesta na média e baixa bacia onde predominam as atividades agropecuárias que contribuem para a descaracterização das margens dos rios e aporte de agrotóxicos em suas águas. O clima consiste em um dos elementos naturais de maior importância para a organização espacial nas bacias, uma vez que influencia nos processos de modelamento da superfície, bem como a quantidade e distribuição de água. Portanto, o conhecimento científico a respeito do comportamento dos atributos climáticos é oportuno e imprescindível aos planos de desenvolvimento econômico e aos projetos de uso racional dos recursos naturais. Um instrumento fundamental ao planejamento das ações de intervenção espacial consiste no mapeamento das características ambientais, a partir do qual pode-se estabelecer diagnósticos e prognósticos para ações antrópicas que melhor estabeleçam a balança entre qualidade ambiental e qualidade de vida. Assim, este trabalho tem como objetivo realizar uma análise das relações entre controles climáticos de superfície e a resposta atmosférica a eles na bacia hidrográfica do Rio das Velhas. O principal produto da pesquisa foi a elaboração de um mapa de unidades climáticas da bacia, visando contribuir com as ações de planejamento e gestão de recursos hídricos e recuperação dos cursos d'água realizadas pelo Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas (CBH-Velhas). Os resultados mostraram que a variação espacial dos atributos meteorológicos no Rio das Velhas é fortemente condicionada pelo relevo em níveis escalares diferentes, enquanto no tempo, o clima da bacia hidrográfica do Rio das Velhas varia de forma mensal sob influência da posição latitudinal da bacia, e de forma anual sob influência de mecanismos e fenômenos complexos do macroclima. Em uma escala zonal, a bacia está inserida no Clima Tropical Brasil Central, caracterizado pela sazonalidade da precipitação, verões quentes e chuvosos e invernos secos e amenos. A superfície da bacia divide-se entre terras altas e rugosas do Quadrilátero Ferrífero ao sul, e da Serra do Espinhaço na borda oeste, e as terras baixas e onduladas a planas da depressão do Rio São Francisco na região central e leste da bacia, e estas seccionam o clima zonal em duas unidades regionais: o Clima Tropical de Altitude e o Clima Tropical Típico. Essas unidades diferenciam-se pelos totais pluviométricos elevados e temperatura do ar reduzida na primeira, em oposição a totais pluviométricos reduzidos e temperatura elevada na segunda. No entanto, essas unidades apresentam características distintas de altitude, rugosidade e posição latitudinal em seu interior que influem sobre a intensidade das características térmicas e pluviométricas gerando a configuração de unidades sub-regionais e locais. Os processos climáticos envolvidos na discretização das unidades climáticas foram ilustrados em perfis esquemáticos, bem como as relações escalares identificadas na área.

Palavras-chave: escalas climáticas, bacia hidrográfica, modelagem cartográfica

ABSTRACT

The hydrographic basin of the Rio das Velhas is one of the main sub-basins of the São Francisco River, having in its territory the capital of the state of Minas Gerais and its metropolitan region (RMBH). Since it drains the most industrialized and densely populated region of the state, the parts of the basin close to the RMBH go through an increasing process of degradation, which also manifests in the medium and low basin where the agricultural activities predominate, contributing to the mischaracterization of the riverbanks and increasing the number of pesticides in its waters. The climate is one of the natural elements of biggest importance for the spacial organization of the basins since it affects the processes of surface modelling as well as the quantity and distribution of water. Because of that the scientific knowledge regarding the behavior of the climate attributes is timely and essential to the planning of economic development and the projects of smart use of natural resources. An essential piece of the spatial intervention planning is the mapping of the environmental characteristics from which one can establish diagnostics and predictions for anthropic actions that optimize the balance between environment quality and life quality. In this context this work aims to achieve an analysis of the relationship between the surface climate controls and their atmospheric response in the hydrographic basin of Rio das Velhas. The main product of this research is the creation of a climate map of the units of the basin, with the intention of contributing to the actions of water planning and management and recovery of the water courses performed by the Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas (CBH-Velhas). The results show that the spatial variation of the meteorological attributes on Rio das Velhas is strongly conditioned by the geographical relief in different scalar levels while on time, the climate of the hydrographic basin of Rio das Velhas changes monthly under the influence of the latitudinal position of the basin and annually under the influence of phenomens and complex mechanisms of the macroclimate. In a zonal scale the basin is inserted in the Tropical Brasil Central Climate, characterized by the precipitation seasonality, hot rainy summers and mild dry winters. The surface of the basin is split into rough highlands of the Quadrilátero Ferrífero on the South, Serra do Espinhaço on the west border, lowland and undulating in the depression of the Rio São Francisco in the central region and east of the basin and these cut the zonal climate into two regional units: the Altitude Tropical Climate and the Typical Tropical Climate. These two units differentiate themselves by the high total rainfall and reduced air temperature in the former in opposition to a reduced total rainfall and high temperature in the later. However, these units show distinct characteristics of altitude, rugosity, and latitudinal position inside, which influences the intensity of the thermal and rainfall characteristics, generating the configuration of sub-regional and local units. The climate processes involved in the discretization of the climate units were illustrated in schematic profiles as well as the scalar relations identified in the area.

Keywords: climate scales, hydrographic basin, cartographic modeling

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: NÍVEIS ESCALARES E CONTROLES GEOGRÁFICOS DO CLIMA.

FIGURA 2: RELAÇÃO ENTRE AS ESCALAS TEMPORAL E ESPACIAL DE FENÔMENOS METEOROLÓGICA COM SEU EQUIVALENTE EM ENERGIA CINÉTICA (JOULES) E COMPARAÇÃO COM OUTROS FENÔMENOS NATURAIS E ANTRÓPICOS..

FIGURA 3: HIERARQUIA, ORGANIZAÇÃO E CONTROLES GEOGRÁFICOS DAS ESCALAS DO CLIMA SEGUNDO MONTEIRO (1976) E MENDONÇA E DANI-OLIVEIRA (2007).

FIGURA 4: METODOLOGIA DE MAPEAMENTO DE UNIDADES TOPOCLIMÁTICAS DA BACIA DO CÔRREGO ESTRANGULADO.

FIGURA 5: MAPEAMENTO DE UNIDADES CLIMÁTICAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAIBUNA EM (A) OLIVEIRA (2013) E (B) OLIVEIRA E FERREIRA (2017).

FIGURA 6: MÉTODO DE ANÁLISE PROPOSTO..

FIGURA 7: ROTEIRO METODOLÓGICO I.

FIGURA 8: ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS E ENTORNO DE 100KM.

FIGURA 9: UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS (A) DEFINIDAS PELO IBGE (2017) E (B) RECLASSIFICADAS. ELABORAÇÃO:..

FIGURA 10: TESTE DE INTERPOLAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO. ELABORAÇÃO:..

FIGURA 11: TESTE DE INTERPOLAÇÃO DA TEMPERATURA MÍNIMA.

FIGURA 12: TESTE DE INTERPOLAÇÃO DA TEMPERATURA MÉDIA.

FIGURA 13: TESTE DE INTERPOLAÇÃO DOS DADOS DE TEMPERATURA MÁXIMA..

FIGURA 14: ROTEIRO DE VALIDAÇÃO DOS DADOS METEOROLÓGICOS DO PROJETO TERRACLIMATE.

FIGURA 15: CORRELAÇÃO ENTRE OS DADOS DE PRECIPITAÇÃO DAS NORMAIS MENSAIS (A) E ANUAIS (B) DE 1961-1990 E DAS NORMAIS PROVISÓRIAS (C E D) DE 1981-2010..

FIGURA 16: CORRELAÇÃO ENTRE OS DADOS DE TEMPERATURA MÍNIMA DAS NORMAIS MENSAIS (A) E ANUAIS (B) DE 1961-1990 E DAS NORMAIS PROVISÓRIAS (C E D) DE 1981-2010.

FIGURA 17: CORRELAÇÃO ENTRE OS DADOS DE TEMPERATURA MÁXIMA DAS NORMAIS MENSAIS (A) E ANUAIS (B) DE 1961-1990 E DAS NORMAIS PROVISÓRIAS (C E D) DE 1981-2010. ELABORAÇÃO:..

FIGURA 18: CORRELAÇÃO ENTRE OS DADOS MENSAIS DE (A) PRECIPITAÇÃO, (B) TEMPERATURA MÍNIMA E (C) TEMPERATURA MÁXIMA DE 1961-2019.

FIGURA 19: CORRELAÇÃO ENTRE OS DADOS DE TEMPERATURA MÉDIA DAS NORMAIS MENSAIS (A) E ANUAIS (B) DE 1961-1990 E DAS NORMAIS PROVISÓRIAS (C E D) DE 1981-2010.

- FIGURA 20: TABELA COM AS ETAPAS PARA O CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO. . . .
- FIGURA 21: ROTEIRO DE CÁLCULO DO ÍNDICE DE CONCENTRAÇÃO DE RUGOSIDADE (ICR). . . .
- FIGURA 22: ROTEIRO DE CÁLCULO DO PCA E DEFINIÇÃO DOS CLUSTERS POR K-MEANS. . . .
- FIGURA 23: CLUSTERS GERADOS A PARTIR DOS EIXOS SIGNIFICATIVOS DA ANÁLISE PCA PELO MÉTODO K-MEANS. . . .
- FIGURA 24: CLASSES GERADAS ATRAVÉS DO K-MEANS SOBRE O RASTER DO PCA. . . .
- FIGURA 25: CATEGORIZAÇÃO E NOTAS ATRIBUÍDAS A CADA VARIÁVEL. . . .
- FIGURA 26: PESOS UTILIZADOS NA ANÁLISE MULTICRITÉRIO E RESULTADO DAS ANÁLISES.. . .
- FIGURA 27: BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS. . . .
- FIGURA 28: DISTRIBUIÇÃO DA POPULAÇÃO NOS MUNICÍPIOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS SEGUNDO O CENSO 2010 (IBGE, 2010). . . .
- FIGURA 29: CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS.. . .
- FIGURA 30: PAISAGENS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS.. . .
- FIGURA 31: USO DA TERRA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS. . . .
- FIGURA 32: DRENAGENS PRINCIPAIS E UNIDADES DE CONSERVAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS.. . .
- FIGURA 33: ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR NA SUPERFÍCIE NOS SOLSTÍCIOS DE VERÃO E INVERNO ÀS 12H NOS PONTOS DE EXTREMA LATITUDE DA BACIA (PIRAPORA E OURO PRETO) CONSIDERANDO-SE UMA SUPERFÍCIE PLANA. . . .
- FIGURA 34: TIPOS CLIMÁTICOS E CLIMOGRAMAS (1981-2010) DA BACIA DO RIO DAS VELHAS. FONTE: IBGE (2002) E INMET (1981-2010). . . .
- FIGURA 35: BALANÇO HÍDRICO (1981-2010) DE LOCALIDADES DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS. FONTE: INMET (1981-2010). . . .
- FIGURA 36: PRECIPITAÇÃO ACUMULADA MÉDIA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS DE 1961 A 1990. . . .
- FIGURA 37: PERFIL GEOECOLÓGICO I. . . .
- FIGURA 38: PERFIL GEOECOLÓGICO II. . . .
- FIGURA 39: BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS NO PERÍODO DE 1961 A 1990. . . .
- FIGURA 40: VELOCIDADE MÉDIA DOS VENTOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS NO PERÍODO DE 1961-1990. . . .

FIGURA 41: PERCENTUAL DA PRECIPITAÇÃO TRIMESTRAL EM RELAÇÃO AO ACUMULADO ANUAL NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS NO PERÍODO DE 1961-1990.

FIGURA 42: MESES SECOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS NO PERÍODO DE 1961 A 1990.

FIGURA 43: NÚMERO DE ANOS PADRÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS DE 1961 A 1990.

FIGURA 44: PERCENTUAL DE ANOS PADRÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS DE 1961 A 1990.

FIGURA 45: PRECIPITAÇÃO ANUAL ACUMULADA MÉDIA POR ANO PADRÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS DE 1961 A 1990.

FIGURA 46: PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL POR ANO PADRÃO (1961-1990).

FIGURA 47: RADIAÇÃO SOLAR MÉDIA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS NO PERÍODO DE 1961 A 1990.

FIGURA 48: TEMPERATURA MÉDIA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS NO PERÍODO DE 1961 A 1990.

FIGURA 49: TEMPERATURA MÍNIMA MÉDIA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS NO PERÍODO DE 1961 A 1990.

FIGURA 50: TEMPERATURA MÉDIA, MÍNIMA E MÁXIMA ANUAL EM MUNICÍPIOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS (1961-1990).

FIGURA 51: TEMPERATURA MÁXIMA MÉDIA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS NO PERÍODO DE 1961 A 1990.

FIGURA 52: PRECIPITAÇÃO ACUMULADA MÉDIA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS NO PERÍODO DE 1991-2019.

FIGURA 53: BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS NO PERÍODO DE 1991-2019.

FIGURA 54: PERCENTUAL DA PRECIPITAÇÃO TRIMESTRAL EM RELAÇÃO AO ACUMULADO ANUAL NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS NO PERÍODO DE 1991-2019.

FIGURA 55: MESES SECOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS NO PERÍODO DE 1991-2019.

FIGURA 56: NÚMERO DE ANOS PADRÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS DE 1991 A 2019.

FIGURA 57: PERCENTUAL DE ANOS PADRÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS DE 1991 A 2019.

FIGURA 58: PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL POR ANO PADRÃO (1991-2019).

FIGURA 59: TEMPERATURA MÉDIA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS NO PERÍODO DE 1991 A 2019.

FIGURA 60: TEMPERATURA MÁXIMA MÉDIA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS NO PERÍODO DE 1991 A 2019.

FIGURA 61: TEMPERATURA MÍNIMA MÉDIA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS NO PERÍODO DE 1991 A 2019.

FIGURA 62: RADIAÇÃO SOLAR MÉDIA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS NO PERÍODO DE 1991 A 2019.

FIGURA 63: ORGANIZAÇÃO ESCALAR DO CLIMA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS.

FIGURA 64: UNIDADES CLIMÁTICAS REGIONAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS.

FIGURA 65: DADOS METEOROLÓGICOS DE 1991 A 2019 EM PONTOS DOS CLIMAS REGIONAIS DA BACIA DO RIO DAS VELHAS.

FIGURA 66: UNIDADES CLIMÁTICAS SUB-REGIONAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS.

FIGURA 67: ÁREA ELEVADA A OESTE DA UNIDADE CLIMÁTICA SUB-REGIONAL C - CLIMA DA SERRA DO ESPINHAÇO.

FIGURA 68: ATRIBUTOS E CONTROLES CLIMÁTICOS SUB-REGIONAIS NA BACIA DO RIO DAS VELHAS - SITUAÇÃO DE VERÃO.

FIGURA 69: ATRIBUTOS E CONTROLES CLIMÁTICOS SUB-REGIONAIS NA BACIA DO RIO DAS VELHAS - SITUAÇÃO DE INVERNO.

FIGURA 70: UNIDADES CLIMÁTICAS SUB-REGIONAIS/LOCAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS..

FIGURA 71: CARACTERÍSTICAS DAS UNIDADES CLIMÁTICAS LOCAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS.

FIGURA 72: ATRIBUTOS E CONTROLES CLIMÁTICOS LOCAIS NA BACIA DO RIO DAS VELHAS - PERFIL A-B.

FIGURA 73: ATRIBUTOS E CONTROLES CLIMÁTICOS LOCAIS NA BACIA DO RIO DAS VELHAS - PERFIL C-D.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: CATEGORIAS TAXONÔMICAS DA ORGANIZAÇÃO GEOGRÁFICA DO CLIMA E SUAS ARTICULAÇÕES COM O CLIMA URBANO

TABELA 2: ESCALAS DOS SISTEMAS DE CIRCULAÇÃO METEOROLÓGICA

TABELA 3: DADOS MATRICIAIS DISPONIBILIZADOS PELO PROJETO TERRACLIMATE

TABELA 4: BASES DE DADOS UTILIZADAS PARA PRODUÇÃO DOS DADOS DO PROJETO TERRACLIMATE

TABELA 5: BASES CARTOGRÁFICAS

TABELA 6: FATOR DE CORREÇÃO (COR) DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM FUNÇÃO DO FOTOPERÍODO E DO NÚMERO DE DIAS DO MÊS

TABELA 7: CLASSIFICAÇÃO DE ANOS PADRÃO

TABELA 8: CLASSES DE ICR DEFINIDAS POR SAMPAIO E AUGUSTIN (2014)

TABELA 9: RECLASSIFICAÇÃO DOS DADOS DE USO E OCUPAÇÃO DA TERRA

TABELA 10: CATEGORIAS DE INTERPRETAÇÃO DO ÍNDICE DE CORRELAÇÃO (R)

TABELA 11: ÍNDICE DE CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E GEOECOLÓGICAS

TABELA 12: RESULTADO DA ANÁLISE PCA

TABELA 13: COBERTURA DA TERRA POR COMPARTIMENTO DE RELEVO NA BACIA DO RIO DAS VELHAS

TABELA 14: COBERTURA DA TERRA AGRUPADA POR TIPO DE USO E POR COMPARTIMENTO DE RELEVO NA BACIA DO RIO DAS VELHAS

TABELA 15: TIPOS DE USO DA TERRA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS

TABELA 16: ATRIBUTOS METEOROLÓGICOS MÉDIOS* DAS UNIDADES CLIMÁTICAS SUB-REGIONAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS

TABELA 17: TIPO DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA POR OUTORGAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB - Alta da Bolívia

AL – Atmosfera Livre

ANA – Agência Nacional de Águas

APAS - Anticiclone Polar do Atlântico Sul

ASAS - Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul

BC - Baixa do Chaco

CLM – Camada Limite de Mistura

CLP – Camada Limite Planetária

CLS – Camada Limite Superficial

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ENOS - El Niño Oscilação Sul

FF - Frente Fria

FPA - Frente Polar Atlântica

GHCN - Global Historical Climatology Network

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICR - Índice de Concentração Rugosidade

IDW - Inverse Distance Weight

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

JBNAS - Jatos de Baixos Níveis da América do Sul

LI - Linhas de Instabilidade

MDE - Modelo Digital de Elevação

netCDF - Network Common Data Form

NW – Noroeste

PCA – Principal Component Analysis

PDRH – Plano Diretor de Recursos Hidrográficos

RAWS - Remote Automated Weather Stations

RBF - Radial Basis Function

RMBH - Região Metropolitana de Belo Horizonte

SE - Sudeste

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SIRGAS - Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

SNOTEL - Snowpack Telemetry

SRTM - Shuttle Radar Topographic Mission

UTM – Universal Transversa de Mercator

VCAN - Vórtice Ciclônico de Altos Níveis

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCOU - Zona de Convergência de Umidade

LISTA DE SÍMBOLOS

% - Porcentagem

°C - Grau Celsius

hab/Km² - habitantes por quilômetro quadrado

km - Quilômetros

km² - Quilômetros quadrados

m - Metros

mm - Milímetros

m/s - Metros por segundo

kWh/m² - Quilowatt-hora

SUMÁRIO

1	1.1	O SISTEMA TERRA-ATMOSFERA E SUAS REPERCUSSÕES ESCALARES.....	23
1	1.2	VARIABILIDADE E OSCILAÇÃO CLIMÁTICA	30
1	1.3	A BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE DE ANÁLISE.....	33
1	1.4	MAPEAMENTO CLIMÁTICO.....	35
2	2.1	MATERIAIS.....	43
	2.1.1	Dados meteorológicos de estações oficiais do INMET.....	44
	2.1.2	Dados meteorológicos matriciais	44
	2.1.3	Bases cartográficas.....	46
2	2.2	PROCESSAMENTO INICIAL DOS DADOS.....	48
	2.2.1	Dados meteorológicos.....	48
	2.2.1.1	Teste de interpolação das variáveis temperatura e precipitação.....	48
	2.2.1.2	Validação dos dados do projeto TerraClimate	52
	2.2.1.3	Cálculo das normais climatológicas, balanço hídrico, meses secos e anos padrão a partir dos dados do projeto TerraClimate.....	56
	2.2.2	Bases cartográficas.....	61
2	2.3	MODELAGEM CARTOGRÁFICA E MAPEAMENTO DAS UNIDADES CLIMÁTICAS	63
	2.3.1	Métodos de delimitação	64
	2.3.1.1	PCA+Kmeans	64
	2.3.1.2	Análise multicritérios	69
	2.3.2	Delimitação das unidades climáticas	71
2	2.4	CONCEITOS E TAXONOMIA ESCALAR	73
4	4.1	NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DE 1961 A 1990	94
	4.1.1	Precipitação e Velocidade dos Ventos	94
	4.1.2	Temperatura e Radiação Solar	109
4	4.2	SÉRIE HISTÓRICA DE 1991 A 2019	117
	4.2.1	Precipitação e Velocidade dos Ventos	117
	4.2.2	Temperatura e Radiação Solar	126
4	4.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ATRIBUTOS CLIMÁTICOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS	133

5.1 ORGANIZAÇÃO ESCALAR DO CLIMA.....	135
5.2 UNIDADES CLIMÁTICAS LOCAIS	147

#\ Vo@ -k° (` -o7@° @`	.
k-7-kOV#@o" @O 8k 7@° o`	.
° hOV) @-o`	.

INTRODUÇÃO

A água é o recurso de maior importância para a manutenção da vida em seus distintos aspectos e formas. Em um planeta cuja composição da superfície compreende 70% deste elemento, sua disponibilidade e acesso é fundamental para as atividades humanas. Assim, ganha visibilidade o desenvolvimento de estudos ambientais por meio da adoção das bacias hidrográficas como unidades espaciais de análise, uma vez que estas são palco das repercussões do ciclo hidrológico. Ademais, o crescente comprometimento da qualidade dos mananciais e da disponibilidade de água potável resultante da ação humana sobre a superfície, torna premente o entendimento da interação entre os processos físico-naturais e socioeconômicos que caracterizam os espaços geográficos das bacias hidrográficas (MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2002; CARVALHO, 2020).

O clima consiste em um dos elementos naturais de maior importância para a organização espacial nas bacias, uma vez que influencia os processos de modelamento da superfície, bem como a quantidade e distribuição de água. Segundo Oliveira e Ferreira (2017), o clima é um regulador central, que influencia direta e indiretamente os fatores bióticos e abióticos, sendo um dos aspectos fundamentais para explicar, prever e entender a organização espacial. É, ainda, um importante fator de mudança na superfície terrestre dada sua natureza variável no espaço e no tempo. Contudo, se por um lado o clima influencia a superfície, por outro, é influenciado por ela a partir da interação entre controles geocológicos e a energia solar que condiciona a variação dos atributos climáticos.

O clima, em uma visão sistêmica, é passível de modificações ao longo do tempo intrínsecas às transformações superficiais, uma vez que a atmosfera e a superfície estão integradas em um movimento recíproco de troca de matéria e energia que compreende o sistema Terra-Atmosfera (JARDIM, 2007). A análise científica dessas transformações, aliada às expectativas sociais, pode proporcionar uma reavaliação do projeto de ocupação dos espaços e exploração dos recursos, influenciando nas metas e decisões do poder público sobre a organização do espaço em prol do estabelecimento de uma balança positiva entre a qualidade ambiental e a qualidade de vida.

O conhecimento científico a respeito do comportamento dos atributos climáticos é oportuno e imprescindível aos planos de desenvolvimento econômico e aos projetos de uso racional dos recursos naturais (ASSIS, 2010). “A estreita relação existente entre os

aspectos climáticos e as atividades agrárias, urbanas e industriais atestam a importância do conhecimento das condições climáticas para o gerenciamento de tais atividades” (MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2002, p. 66).

Um instrumento fundamental ao planejamento das ações de intervenção espacial consiste no mapeamento das características ambientais, a partir do qual pode-se estabelecer diagnósticos e prognósticos para ações antrópicas que melhor estabeleçam a balança entre qualidade ambiental e qualidade de vida. Os diagnósticos ambientais realizam-se mediante a quantificação, mapeamento e análise dos atributos geográficos da área, confrontados e correlacionados entre si sob enfoque sistêmico, de modo que permitam o equacionamento de problemas decorrentes das atividades socioeconômicas (MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2002). A partir deles, pode-se gerar prognósticos a fim de contribuir para o planejamento do uso e ocupação da terra.

Em Minas Gerais, a bacia hidrográfica do Rio das Velhas, cujo curso d'água principal é o maior afluente do Rio São Francisco, destaca-se em importância por abrigar a capital do estado e sua região metropolitana (RMBH). A bacia comporta cerca de 23% da população do estado e abarca, em sua extensão, atividades econômicas fundamentais para o PIB estadual e nacional, como a mineração de ferro, ouro e outros metais, e as atividades tecnológicas e industriais na RMBH. Devido a sua longa extensão, com um rio principal medindo cerca de 806km da nascente, em Ouro Preto, à foz, em Várzea da Palma, a bacia do Rio das Velhas é um território de paisagens diversas, com vegetação que varia de florestas da mata atlântica a vegetações abertas do cerrado e de campos rupestres, extensas áreas planas e rebaixadas, em oposição a áreas de relevo rugoso e elevado, além de cidades com múltiplas composições do tecido urbano.

Por drenar a região mais industrializada e densamente povoada de Minas Gerais, os trechos da bacia próximos à RMBH passam por um crescente processo de degradação, que também se manifesta nas áreas do médio e baixo Velhas onde predominam as atividades agropecuárias e baixa ocupação urbana, responsáveis pela descaracterização das margens dos rios e aporte de agrotóxicos em suas águas. No intuito de promover ações de revitalização e recuperação dos afluentes da bacia e de seu curso principal, o Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas (CBH-Velhas) desenvolve projetos hidroambientais que buscam, pela ação pontual em pequenas áreas espalhadas da bacia, a manutenção da quantidade e qualidade das águas, preservando suas condições naturais de oferta hídrica. Estes projetos consistem na proteção de nascentes com cercamentos,

adequação de estradas vicinais com a construção de barraginhas¹ e a construção de terraços e curvas de nível em morros e encostas (CBH-VELHAS, s.d.). Além disso, o comitê gerencia projetos de saneamento, monitoramento e biomonitoramento da qualidade das águas, análise da influência da outorga da água sobre a disponibilidade hídrica e a implantação de viveiros de mudas (CBH-VELHAS, 2014).

Em uma reunião realizada com o analista ambiental da equipe de mobilização do CBH-Velhas, Élio Domingos Neto, foi apresentada a necessidade de um levantamento das características climáticas da bacia que embasasse, cientificamente, o desenvolvimento e aplicação dos projetos hidroambientais no território hidrográfico do Rio das Velhas (DOMINGOS, 2019). Segundo Élio, o sucesso na implantação de projetos como a instalação de viveiros de mudas, por exemplo, depende diretamente do conhecimento a respeito dos padrões climáticos de diferentes locais da bacia, uma vez que o cultivo de mudas em locais de baixa aptidão climática gera perdas significativas no desenvolvimento das plantas.

Foi abordada, ainda, a preocupação a respeito do conhecimento dos padrões de chuva da bacia, os quais interferem tanto na disponibilidade hídrica nas áreas de captação de água, quanto na adequação dos projetos hidroambientais à diferentes características espaciais ao longo da bacia. Tendo em vista o exposto, os objetivos deste trabalho são apresentados a seguir.

OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral realizar uma análise das relações entre controles climáticos de superfície e a resposta atmosférica a eles na bacia hidrográfica do Rio das Velhas.

Especificamente, pretende-se:

- Á Investigar a composição de controles geográficos e dinâmicos do clima e a repercussão espacial dos atributos climáticos (precipitação, temperatura, vento, radiação solar);
- Á Estabelecer um modelo conceitual das relações superfície-atmosfera na produção do clima em escala local, buscando vinculá-las às determinantes do clima

¹ Termo utilizado pela EMBRAPA para caracterizar pequenas bacias de contenção. A função principal deste sistema é captar as enxurradas, evitando a erosão dos solos, e proporcionar a infiltração da precipitação no terreno com a recarga gradual do nível freático.

(sub)regional e zonal, tendo em vista o enfoque geográfico (escala-tempo-espço);

- ÁElaborar uma síntese das relações observadas entre as características geocológicas e de ocupação com o comportamento climático por meio da elaboração de uma carta de unidades climáticas e perfis geocológicos.

QUESTÃO E HIPÓTESES

Considerando-se o caráter dinâmico que o conceito de ritmo emprega ao clima e a relação superfície-atmosfera, núcleo do sistema climático, cujas resultantes se propagam em nível multiescalar, surgiram os seguintes questionamentos:

- Á Como e/ou quanto os aspectos da superfície influenciam o clima na bacia hidrográfica do Rio das Velhas?

A fim de responder a estes questionamentos, serão testadas algumas hipóteses elencadas abaixo.

1.ÁA variação da latitude e da altitude são controles primordiais do padrão térmico da bacia, tornando as áreas de menor latitude e maior altitude aquecidas em relação às áreas de maior latitude e menor altitude, enquanto a rugosidade da superfície responde pela distribuição de chuvas, sendo as áreas de relevo mais rugoso, mais chuvosas em relação às áreas de relevo menos rugoso;

2.ÁA borda leste (Serra do Espinhaço) e a região sul da bacia (Quadrilátero Ferrífero) consistem em áreas de barreira orográfica em função das altitudes mais elevadas motivo pelo qual as bordas e o sul da bacia são mais úmidos e o centro, norte e oeste, mais secos.

JUSTIFICATIVAS

À medida em que se transitam as dimensões de espaço e tempo, organizam-se fenômenos climáticos que se propagam em diferentes escalas e necessitam de distintas formas de abordagem metodológica para que sejam investigados (MONTEIRO, 1976). A abordagem em níveis escalares faz menção à análise sistêmica do clima, uma vez que, pressupõe a compreensão das conexões que se estabelecem entre os fenômenos climáticos que se propagam em distintas escalas. Assim, este trabalho contribuirá para uma discussão que não se esgota no contexto da climatologia geográfica, a qual consiste na abordagem multiescalar do clima como forma de compreender os desdobramentos horizontais do perfil vertical de propagação dos processos climáticos.

Ademais, este trabalho preocupa-se com o desenvolvimento técnico-metodológico na apresentação de informações sobre recursos naturais para serem usados no planejamento de ações de ocupação e ordenação do espaço, sobretudo em situações em que é demandada a leitura de grandes unidades naturais. Feitoza *et al.* (2010) apontam para a necessidade de propiciar uma forma de mapa prontamente inteligível ou assimilável por não especialistas no assunto quando se trabalha na gerência de espaços de extensão regional, como é o caso da bacia do Rio das Velhas.

O mapeamento de unidades climáticas como subsídio de ordenação do espaço já é comum nos espaços urbanos, com diversos exemplos da aplicação deste recurso (TARIFA E ARMANI, 2000; JARDIM, 2007; ASSIS, 2010; REN *et al.*, 2010; BAUMÜLLER *et al.*, 2012; MACHADO, 2016). Na escala regional, os mapas podem ser úteis aos planos diretores de bacia hidrográfica, documentos obrigatórios e essenciais ao gerenciamento das bacias. Especialmente, a produção de um mapeamento de características climáticas da bacia poderá subsidiar decisões sobre a alocação de recursos na recuperação e revitalização dos cursos d'água no Velhas.

Este trabalho gerou, ainda, a criação de uma plataforma própria para divulgação de pesquisas científicas produzidas sobre a bacia hidrográfica do Rio das Velhas, onde os pesquisadores poderão divulgar em uma linguagem simples e objetiva os resultados de seus trabalhos acadêmicos, democratizando o acesso à ciência e a informações valiosas para gestores e comunidade envolvida na gerência da bacia. A Plataforma Velhas (<https://www.plataformavelhas.info/>) conta com um servidor de mapas para download gratuito dos dados espaciais gerados em pesquisas desenvolvidas no território do Velhas, bem como metadados completos dos produtos disponibilizados, consistindo em uma contrapartida da pesquisa à comunidade.

Além desta introdução, este trabalho inclui outros cinco capítulos, considerações finais e referências bibliográficas. O primeiro capítulo apresenta os principais aspectos teóricos e bases conceituais relativos ao Sistema Terra-Atmosfera, às variabilidades e oscilações climáticas e estudos de caso de mapeamentos climáticos. No segundo capítulo é realizada a caracterização da área de estudo, a qual compreende a descrição dos aspectos físicos associados ao comportamento atmosférico na bacia hidrográfica do Rio das Velhas. O terceiro capítulo trata dos materiais e procedimentos metodológicos adotados para a realização desta pesquisa. O quarto capítulo trata dos resultados das análises de dados meteorológicos da bacia hidrográfica do Rio das Velhas e sua relação com os aspectos da superfície. O capítulo cinco traz o resultado do mapeamento climático da bacia e a organização multiescalar dos atributos e controles climáticos na bacia.

1. BASES TEÓRICAS E CONCEITUAIS

1.1 O sistema Terra-Atmosfera e suas repercussões escalares

O sistema Terra-Atmosfera compreende o balanço de energia resultante das relações entre os gases atmosféricos, a superfície terrestre e a radiação solar. A parte mais sensível desse sistema encontra-se no contato entre superfície e atmosfera, onde as características geocológicas² dos ambientes interagem com a energia solar, condicionando a variação dos atributos climáticos. Dessa forma, as características da superfície consistem nos controles geográficos do clima, a radiação solar é o input energético do sistema e o output está presente na repercussão espacial climática (JARDIM, 2015).

Os fenômenos climáticos resultantes da interação superfície-atmosfera ocorrem no interior da Camada Limite Planetária (CLP), a qual consiste na extensão da troposfera mais próxima da superfície que é diretamente afetada por processos ou eventos superficiais (MATOS *et al.*, 2007). Os fatores que alteram a CLP são o aquecimento basal, devido à incidência de energia solar, a absorção dessa energia pela superfície, a transpiração das plantas, os ventos locais, entre outros. Nessa camada prevalecem as trocas energéticas por condução e convecção. Sua extensão vertical pode variar de centenas de metros até por volta de dois quilômetros, em função das influências das forçantes já citadas (STULL, 1988; MOREIRA, 2013).

A CLP estratifica-se na Camada Limite Superficial (CLS) e na Camada Limite de Mistura (CLM). A primeira é a mais próxima da superfície, compreendendo até 10% da espessura da CLP e sendo influenciada diretamente pelas características da superfície, tendo o gradiente vertical térmico, hídrico e anemométrico altamente variável (STULL, 1988; MOREIRA, 2012). Já a CLM consiste na faixa onde os movimentos convectivos do ar são determinantes para caracterizá-la, havendo a influência da força de fricção, gradientes de pressão e da rotação terrestre (MOREIRA, 2012). Para além da CLP configura-se a Atmosfera Livre (AL) onde a influência da superfície sobre os gradientes térmicos e barométricos são inexpressivos e turbulência limita-se às nuvens convectivas de profundidade e relacionada às correntes de jatos (STULL, 1988). Portanto, ainda que a

² Considera-se aqui, como características geocológicas a composição de atributos e elementos físicos e socioeconômicos que compõem o espaço.

quantidade de energia solar incidente no topo da atmosfera seja relativamente constante ao longo de uma faixa latitudinal, o que ocorre no interior da CLP diversifica o clima, já que a forma como a superfície terrestre recebe e distribui essa energia é distinta em função dos múltiplos arranjos geocológicos superficiais e do ritmo climático que estabelecem identidades climáticas em diferentes níveis escalares.

A escala confere um sentido particular ao fenômeno climático observado, sendo que cada recorte coloca em evidência relações, fenômenos e fatos que em outro recorte não teriam a mesma visibilidade (CASTRO, 1995). Assim, a cada escala espaço-temporal de manifestação dos fenômenos climáticos, associam-se distintos fatores de organização climática e tempos de resposta a eles. Portanto, há necessidade de se adotar diferentes dados ou fontes de informações meteorológicas e estratégias de abordagem desses fenômenos (CONTI, 1995; MONTEIRO, 2001). Monteiro (1976) exemplifica esse postulado caracterizando a abordagem da organização geográfica do clima e suas articulações com o clima urbano (Tabela 1).

Tabela 1: Categorias taxonômicas da organização geográfica do clima e suas articulações com o clima urbano

ORDENS DE GRANDEZA (CAILLEUX & TRICART)	UNIDADES DE SUPERFÍCIE	ESCALAS CARTOGRÁFICAS DE TRATAMENTO	ESPAÇOS CLIMÁTICOS	ESPAÇOS URBANOS	ESTRATÉGIAS DE ABORDAGEM		
					MEIOS DE OBSERVAÇÃO	FATORES DE ORGANIZAÇÃO	TÉCNICAS DE ANÁLISE
Q	F ^e A ^t q @ ^ . / ^ ^ / S {	FK I EEEEEE AAAA FI EEEEEE	Z { } #	E	U ^{ax} . l ^{ar} . Á P [^] - a ^j | j ^a ^	S ^{ax} a [^] / O [^]) d [/ ^ ^ , a ^b e [/ ^ ^ [. - . j . a ^{ax}	O ^{ax} a ^b c [^] a ^{ax} a ^b e [ / ^ ^ | a [^] Á & [{ } a ^{ax} a ^b a ^c a ^d a ^e
Q	F ^e A ^t q @ ^ . / ^ ^ / S {	FK I EEEEEE AAAA FI EEEEEE	Ü [^] * q } #	E	O ^{ax} a ^b c [^] Á q 5 a ^{ax} a ^b c [^] / U [] a ^{ax} ^) . Á a ^b ! [5 [^] a ^{ax}	Ü [^] a [^] c [] a ^{ax} a ^b . Á { ^ c [] [5 [^] a ^{ax} . Á Q [^] a [^] & a ^{ax} e [Á . ^ & } a [^] a ^{ax} D	Ü [^] a [^] Á V [^] a [^] . ^ & q .
Q	F ^e A ^t q @ ^ . / ^ ^ / S {	FK I EEEEEE AAAA FI EEEEEE	Ü [^] a [^] E [^] U [^] * q } # Q [^] & a [^] . D	T [^] d 5 [] ^ Á | a [^] a [^] / ^ a [^] Á { ^ d [] [] a [^] a [^] a [^]	Ü [^] a [^] Á { ^ c [] [5 [^] a ^{ax} Á a [^] Á ^ ^ | ^ ^ a [^] .	Q [^] a [^] ^ . Á * ^ | ^ | a [^] . Á | ^ * q } a [^]	T [^] a [^] a [^] a [^]) d Á . a [^] c { | c [^]
X	F ^e A ^t q @ ^ . / ^ ^ / S {	FI EEEEEE AAAA FI EEEEEE	Š | & a [^]	7 [^] a [^] Á { ^ d [] [] a [^] a [^] a [^]	Ü [^] . d Á { ^ c [] [5 [^] a ^{ax} Á Ü [^] a [^] Á	Q [^] a [^] a [^] e [Á * ^ | ^ & [ 5 [^] a ^{ax} Á O [^] e [/ a [^] d 5] a ^{ax}	Q [^] j ^a Á ^ . | a [^] a [^] a [^]
XQ	F ^e A ^t q @ ^ . / ^ ^ / S {	FK I EEEEEE AAAA FI EEEEEE	T [^] . ^ & q a [^] a [^]	O [^] a [^] a [^] Á | a [^] a [^] Á O [^] a [^] Á . Á . ^ a [^] g [^] a [^] a [^] Á { ^ d 5 [ ] | ^ Á Ü [^] ^ ^ ^) a [^] a [^] a [^] a [^]	Ü [^] a [^] . a [^] d | . Á { 5 [^] a [^] Á Q [^] a [^] 5 a [^] a [^] [. D	W [^] a [^] a [^] a [^] { []	
E	O [^] . ^) a [^] Á ^ Á ^ d | .	FK I EEEEEE AAAA FK I EEEEEE	V [ ] | & q a [^] a [^]	Q [^] & a [^] . Á a [^] a [^] [] ^ a [^] g [^] a [^] a [^] Á a [^] Á a [^] a [^] a [^] Á	Q [^] a [^] a [^] @ D	O [^] E [^] ^ a [^] c [^] a [^]	O [^] ^ & a [^] a [^]
E	T [^] d | .	FI EEEEEE	T [^] a [^] & q a [^] a [^]	O [^] a [^] a [^] Á ^ a [^] a [^] a [^] e [Á O [^] a [^] a [^] e [Á ^ d | Á	O [^] a [^] a [^] a [^] Á q . d [^] { ^) d . Á ^ . | a [^] a [^] a [^]	P [^] a [^] a [^] a [^] e []	

Fonte: Adaptado de Monteiro (1976).

Nota-se que nas escalas hierárquicas de maior extensão, ou seja, aquelas que excedem o clima Sub-regional, não é possível identificar derivações de cunho

antropogênico em função da resposta atmosférica a fatores que excedem a capacidade de "controle" humano nestes níveis, como a circulação de massas de ar. Portanto, a capacidade do homem em alterar o clima e os sistemas naturais não se deve a uma ação direta na atmosfera, a qual é regida por comandos de escalas superiores, mas a uma ação indireta que reside nas alterações sobre a superfície terrestre (MONTEIRO, 2001). Assim, *“o comportamento atmosférico, integrado às demais esferas e processos naturais, ‘organiza’ espaços climáticos a partir das escalas superiores em direção às inferiores”*, enquanto *“a ação antrópica em derivar ou ‘alternar’ essa organização ocorre no sentido inverso, ou seja, das escalas inferiores para as superiores”* (MONTEIRO, 2001, p. 200).

Monteiro (1999) acrescenta que a hierarquia das escalas climáticas diversifica funções entre os diferentes níveis escalares atribuindo à escala zonal o papel diversificador do clima, organizador à escala regional e de especialização ao nível local. Para Jardim (2015), isso pode ser interpretado no sentido de situar a “gênese” ou origem do clima nas escalas superiores (massas de ar ou sistemas atmosféricos), a organização em mesoescala por meio do tempo ou ritmo, e de repercussão espacial ou de impacto de um dado evento ou fenômeno climático em microescala, onde há uma multiplicidade de situações que (des)organizam o ambiente e a sociedade.

Ribeiro (1993, p. 288), descreve seis critérios para a fundamentação conceitual das escalas climáticas. Segundo o autor,

- a) São consideradas escalas superiores aquelas mais próximas do nível planetário e escalas inferiores àquelas mais próximas dos indivíduos habitantes da superfície da Terra;
- b) As combinações de processos físicos interativos numa escala superior resultam em modificações sucessivas no comportamento da atmosfera nas escalas inferiores;
- c) As combinações particulares de processos físicos nas escalas inferiores possuem limitada repercussão nas escalas superiores;
- d) O grau de dependências da radiação extra-terrestre na definição climática é maior nas escalas superiores, enquanto que a influência dos elementos da superfície, inclusive a ação antrópica, vai-se tornando mais pronunciada na medida em que se atingem as escalas inferiores;
- e) Quanto mais extenso o resultado de determinada combinação, maior será o tempo de sua permanência, sendo o inverso igualmente verdadeiro;
- f) A extensão de uma determinada combinação na atmosfera resulta num atributo tridimensional sendo, portanto, volumétrica a noção de extensão, em Climatologia, e tendo como limite superior o próprio limite da atmosfera terrestre.

Considerando-se estas premissas e as possibilidades de interação, ao longo do tempo e do espaço, entre os fluxos de energia e os controles geográficos, Ribeiro (1993) define três níveis interativos como bases para uma proposta taxonômica escalar, os quais

consistem no nível macroclimático, mesoclimático e microclimático (Figura 1). O nível macroclimático diz respeito à interação entre a radiação solar e fatores globais de influência climática, como a curvatura da Terra, os movimentos de rotação e translação. O nível mesoclimático consiste na interação entre a energia disponível para o processo de evaporação e a geração de campos de pressão e as feições do meio terrestre. Já o nível microclimático consiste na interação entre os sistemas ambientais particulares na modificação dos fluxos de energia, umidade, massa e momentum.

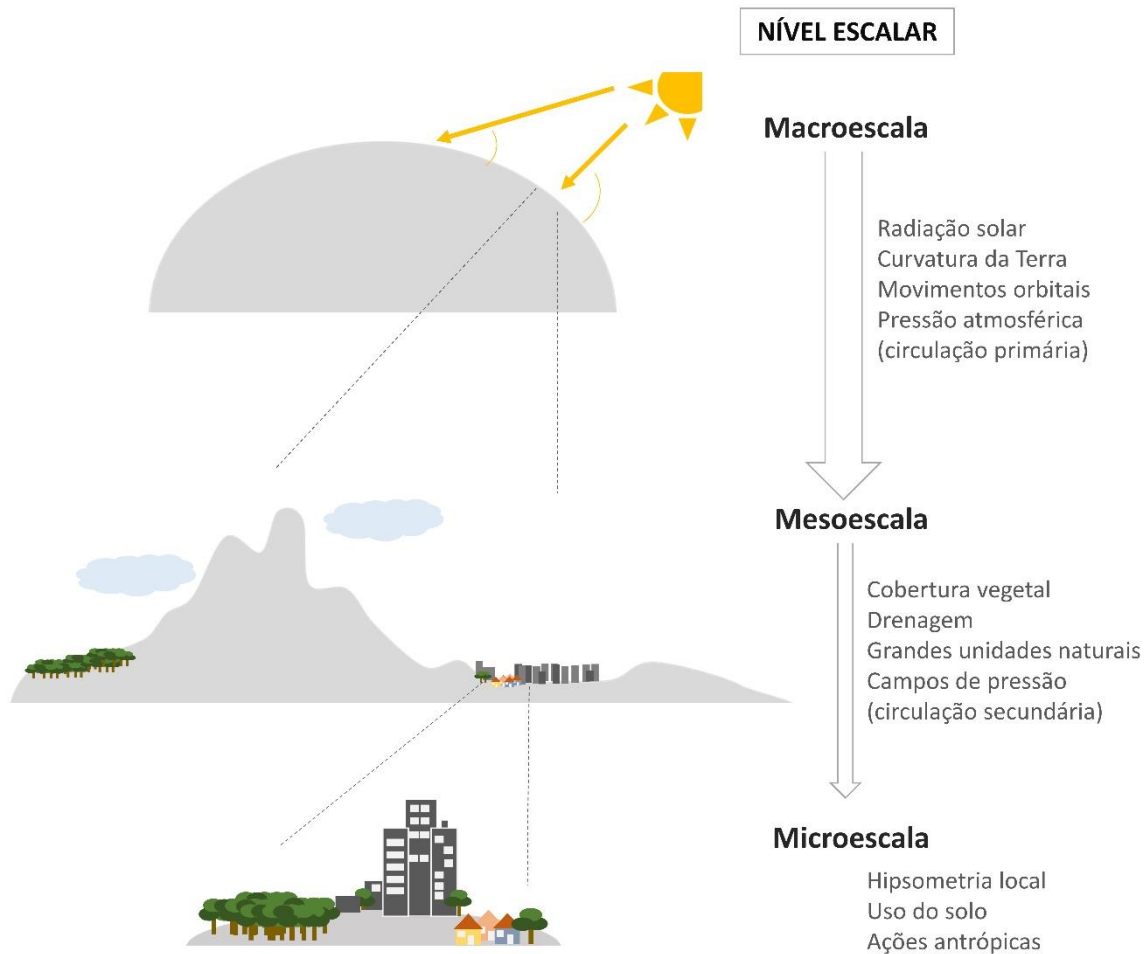


Figura 1: Níveis escalares e controles geográficos do clima. Elaboração: Lilian machado.

Mendonça e Danni-Oliveira (2007) apresentam medidas espaciais e temporais relacionadas às manifestações nos níveis climáticos (Tabela 2). Já Barry e Chorley (2013) relacionam os fenômenos meteorológicos às dimensões espacial e temporal, e a escala em energia cinética desses, comparando-os a outros fenômenos antrópicos e naturais (Figura 2). Esses limites espaciais consistem em referências para o recorte espacial do objeto de estudo, porém, o pesquisador não deve se ater cegamente a estas métricas, já que na natureza não existem limites estáticos e intransponíveis à atuação dos fenômenos

naturais. Tais categorias, independente do suporte teórico-metodológico que empregam para basear seus conceitos, são arbitrárias e artificiais, uma vez que os fenômenos atmosféricos se manifestam de forma contínua e indivisível (OKE, 1978; ASSIS, 2010). Sorre (2006, p. 91) depõe a favor da definição de zonas-limítrofes ou manchas nas quais se fazem e se desfazem conjuntos de elementos característicos de regiões climáticas em contato e nas quais combinações de fatores podem fazer reaparecer localmente um ou outro clima das vizinhanças em toda sua extensão. **A**

Tabela 2: Escalas dos sistemas de circulação meteorológica

ORDEM DE GRANDEZA	SUBDIVISÕES	ESCALA HORIZONTAL	ESCALA VERTICAL	TEMPORALIDADE DAS VARIÁÇÕES MAIS REPRESENTATIVAS	EXEMPLIFICAÇÃO ESPACIAL
Macroclima	Clima zonal Clima regional	>2.000km	3 a 12km	Algumas semanas a vários decênios	O globo, um hemisfério, oceano, continente, os mares etc.
Mesoclima	Clima regional Clima local Topoclima	2.000km a 10km	12km a 100m	Várias horas a alguns dias	Região natural, montanha, região metropolitana, cidade etc.
Microclima		10km a alguns m	Abaixo de 100m	De minutos a dias	Bosque, uma rua, uma edificação/casa etc.

Fonte: Adaptado de Mendonça e Danni-Oliveira (2007).

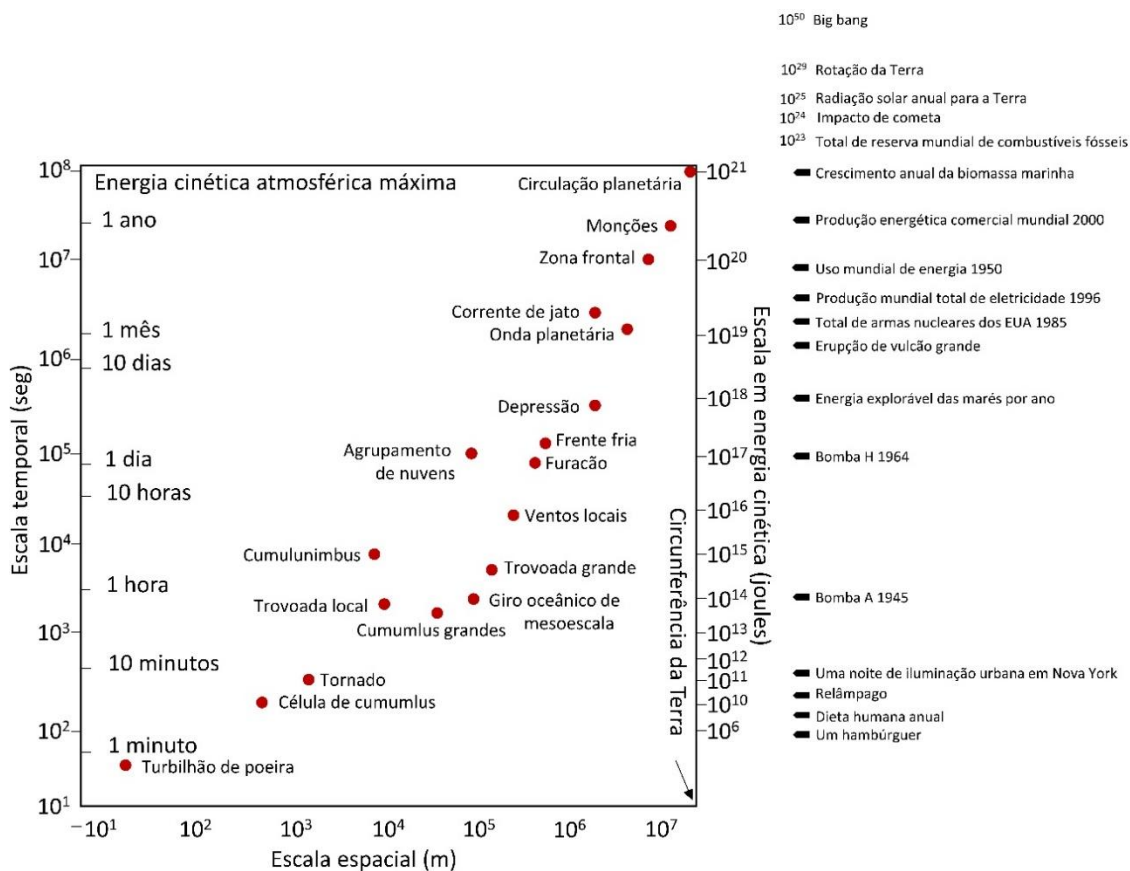


Figura 2: Relação entre as escalas temporal e espacial de fenômenos meteorológica com seu equivalente em energia cinética (joules) e comparação com outros fenômenos naturais e antrópicos. Fonte: Adaptado de Barry e Chorley (2013).

Pode-se distinguir a atuação do clima nas seguintes categorias taxonômicas:

- **ÁZonal ou macroclima:** compreende escalas espaciais que abrangem amplas áreas da Terra, além de uma amplitude vertical de cerca de 10km (AYOADE, 1996). Nessa categoria, os principais controles que atuam na organização climática são a latitude, a altitude, a distância dos oceanos e o movimento de rotação da Terra. Para a análise, neste nível de abordagem, é necessário, geralmente, um longo período de observações meteorológicas utilizando-se, como principais fontes de dados, as normais pluviométricas e térmicas ou ainda os valores médios que representam quaisquer outros atributos climáticos. Ainda, sob abordagem genética do clima, busca-se estudar a circulação geral da atmosfera (CONTI, 1995).
- **ÁRegional ou mesoclima:** o clima regional consiste em uma subunidade de transição entre a ordem superior e a inferior (MENDONÇA e DANI-OLIVEIRA, 2007). Como variáveis para o estudo do clima regional, destacam-se a exposição, a forma e a orientação do relevo e o ritmo de variação anual dos sistemas climáticos. Neste nível, as variações anuais da área de abrangência dos centros de ação de alta e baixa pressão definem o ritmo sazonal e mensal dos principais atributos climáticos (CONTI, 1995). Conti (1995) destaca que não só as médias ou normais de um longo período devem ser adotadas para o estudo, mas também deve-se abordar as variações mês a mês ou por estação durante um período selecionado por critério de representatividade dentro da série de dados abordada.
- **ÁLocal:** neste nível, destacam-se as alterações provocadas pelas atividades humanas no clima (CONTI, 1995). De acordo com Oke (2004), o clima local refere-se àquele que abrange áreas homogêneas em relação à ocupação do solo. Mendonça e Dani-Oliveira (2007) destacam que os climas locais são subunidades do mesoclima marcados por aspectos específicos de determinados locais como uma grande cidade, um litoral, uma área agrícola ou outras.
- **ÁTopoclima:** trata-se de uma categoria taxonômica especial, na qual as características topográficas, ou seja, a declividade, exposição e forma do terreno, influem na quantidade de calor recebido do sol (TARIFA, 1981; CONTI, 1995; MENDONÇA E DANI-OLIVEIRA, 2007). Além disso, a circulação atmosférica nessas áreas obedece aos fatores de morfologia do terreno. A extensão horizontal dos topoclimas restringe-se à forma do relevo ou ao tamanho da vertente que lhe dá origem (RIBEIRO, 1993).

• **ÁMicroclima:** o microclima é resultado da magnitude das trocas gasosas e energéticas entre as feições ou estruturas particularizadas dispostas na superfície da Terra e o ar que as envolve. Nesta escala, a micro-rugosidade, a cor e a textura das superfícies, junto aos abrigos, como as edificações e a vegetação constituem-se nos elementos que promovem a diferenciação na magnitude das trocas energéticas e gasosas que irão definir o comportamento do ar circundante (Ribeiro, 1993). Enquanto Ayoade (1996) define uma extensão de até 100m para os microclimas, Ribeiro (1993) defende que o estabelecimento de limites rígidos pode não trazer resultados palpáveis, uma vez que o a repercussão espacial microclimática depende da natureza da superfície que lhe dá origem.

É preciso ressaltar que alguns conceitos relacionados à taxonomia escalar na climatologia apresentam significados diversos na comunidade científica. Mendonça e Dani-Oliveira (2007) apontam para uma controvérsia entre climatologista e meteorologistas no tocante às escalas climáticas, que Jesus (2008) explica estar relacionada à priorização da questão espacial por geógrafos, em oposição à importância dada a questão temporal pelos meteorologistas. No entanto, é possível observar discrepâncias na conceituação e hierarquização de escalas mesmo entre climatologistas. Um exemplo disso é o conceito de mesoclima, que para Mendonça e Dani-Oliveira (2007) abrange a escala regional e a local, enquanto para Monteiro (1976) está inserido no clima local, por sua vez componente do clima regional (Figura 3). Assis (2010, p. 17) também aponta para esta diferenciação.

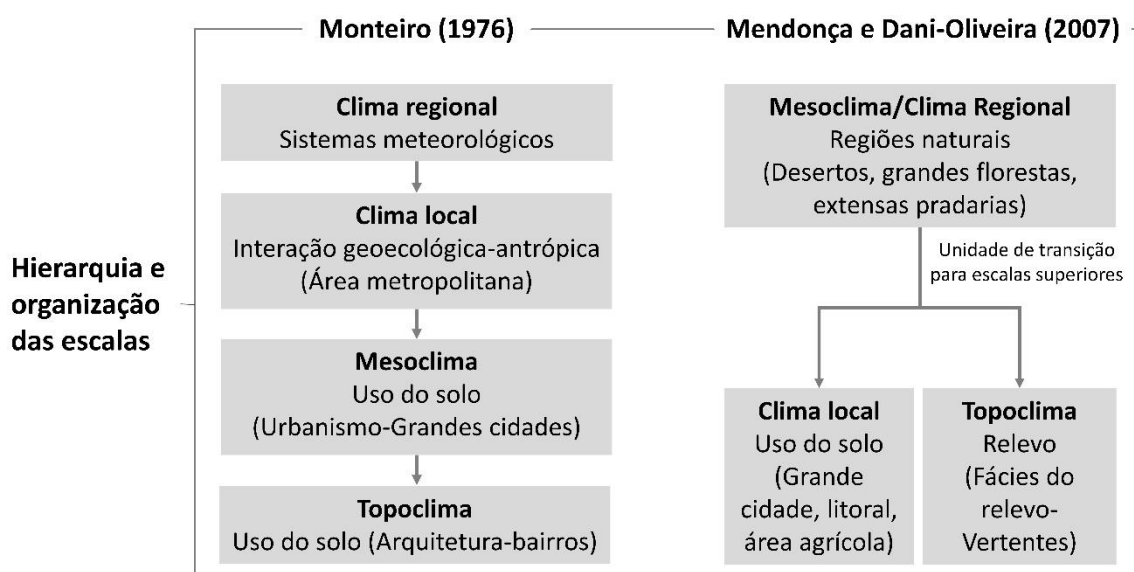


Figura 3: Hierarquia, organização e controles geográficos das escalas do clima segundo Monteiro (1976) e Mendonça e Dani-Oliveira (2007). Organização: Lilian Machado.

1.2 Variabilidade e oscilação climática

A variação dos parâmetros meteorológicos é uma característica inata do sistema climático terrestre, seja ela observada em nível local, regional ou global. A variabilidade climática pode ser entendida como a maneira pela qual os atributos climáticos variam ao longo de uma série temporal como resultado de processos internos próprios do sistema e/ou de variações em fatores externos naturais ou antropogênicos (WMO, s. d.). Alguns fenômenos apresentam fortes correlações com as variações climáticas, como a ciclicidade das manchas solares, os episódios de El Niño/Oscilação Sul (ENOS), atividade vulcânica e fenômenos astronômicos (SANT'ANA NETO, 2003).

Sant'ana Neto (2003) destaca que as precipitações pluviométricas se demonstram mais suscetíveis a tais irregularidades do que outros atributos do clima como a temperatura, por exemplo.

No caso da temperatura, existe um forte componente sazonal relacionado à radiação solar, que imprime uma marcha anual mais ou menos bem definida. A pluviosidade, entretanto, mostra-se muito mais complexa, uma vez que os mecanismos dinâmicos que produzem as chuvas variam (muitas vezes de modo aleatório ou quase caótico) em escalas temporais muito reduzidas [...]

Sant'ana Neto (2003, p. 55)

Na América do Sul, o fenômeno El Niño/Oscilação Sul (ENOS), junto à Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e às anomalias de temperatura da superfície do oceano (TSM) Atlântico, afetam a distribuição mensal e anual das chuvas, provocando anomalias positivas ou negativas de grande repercussão ambiental e social.

El Niño/La Niña caracteriza-se pelo aquecimento/resfriamento das águas superficiais do oceano Pacífico Tropical Central e do Leste, que reflete em um gradiente de pressão atmosférico entre o leste deste oceano, próximo à América do Sul, e o oeste, próximo à Oceania, modificando o regime de chuvas sobre o continente. A conexão entre as oscilações na TSM do Pacífico Tropical e a circulação atmosférica, constitui o fenômeno de interação oceano-atmosfera definido como ENOS.

No Brasil, os impactos pluviométricos deste fenômeno são mais expressivos no Nordeste da Amazônia (tendência para secas na fase quente) e no Sul do Brasil (tendência para chuvas na fase quente), conforme observaram Lucena *et al.* (2011); Britto *et al.* (2008); Cavalcanti (s.d.); Freire *et al.* (2011) e Galvêncio e Sousa (2002). No centro-

sudeste do país, Grimm & Tedeschi (2004) observaram que, em episódios ENOS, o número de eventos extremos de precipitação tende a diminuir durante a primavera.

Em Minas Gerais, Silva (2013) notou que a fase positiva do ENOS (El Niño) não possui influência significativa, enquanto a fase negativa do ENOS (La Niña) tende a reduzir a precipitação no verão, em grande parte do estado. Minuzzi *et al.* (2005) observaram uma característica marcante do El Niño em ocasionar chuvas abaixo da média no nordeste do estado e chuvas acima da média climática no sudoeste de Minas Gerais. Os autores também concluíram que em eventos El Niño, o início do período chuvoso tende a tardar no centro, norte e nordeste de MG.

Na bacia do Rio São Francisco, Galvêncio e Sousa (2002), observaram uma relação direta entre a precipitação e os índices de anomalias de TSM. Segundo os autores, em anos de El Niño as chuvas apresentaram aumento significativo nas sub-regiões do Alto São Francisco (ASF), onde está localizada a bacia do Rio das Velhas, e Médio São Francisco (MSF) e diminuição na sub-região do Baixo São Francisco (BSF). Por outro lado, em ano de evento La Niña os autores observaram o contrário, apesar de algumas poucas contradições.

As temperaturas da superfície do Oceano Pacífico apresentam uma configuração com variações de prazo mais longo que se assemelham aos eventos ENOS a qual é denominada Oscilação Decadal do Pacífico (ODP). A ODP também apresenta fases frias, quando há uma diminuição das temperaturas do Pacífico, e quentes, quando há o aquecimento, que podem perdurar de 20 a 30 anos, enquanto os ENOS variam de 6 a 18 meses (MOLION, 2005). Conforme afirma Firpo e Sansigolo (2010), “a ODP não controla fisicamente o ENOS, mas os dois fenômenos interagem mutuamente e, portanto, não podem ser considerados independentes.” No entanto, a associação entre esses fenômenos pode ter efeitos combinados na distribuição das chuvas em algumas regiões como a definição de anomalias fortes de precipitação quando estão na mesma fase e anomalias fracas e mal definidas em fases opostas (ANDREOLI e KAYANO, 2005).

Santos (2011) observou anomalias negativas quando houve a associação entre as fases frias da ODP e ENOS na parte mineira da bacia hidrográfica do Rio São Francisco. Já Queiroz (2013) investigou a tendência em séries de precipitação diária máxima anual na região central de MG, relacionando os dados com a ocorrência de ENOS e ODP e não identificou sinal forte de associação entre os fenômenos. Segundo a autora, as análises realizadas no estudo não permitiram a identificação de tendências ou padrões espaciais

de variação das precipitações diárias máximas por ano hidrológico, apenas indícios da ocorrência de tendências positivas nas latitudes superiores a 19° Sul. A autora enfatiza que não é possível afirmar que essas anomalias estejam associadas diretamente às fases extremas do El Niño Oscilação Sul, embora haja uma possível influência da Oscilação Decadal do Pacífico na frequência das precipitações diárias máximas por ano hidrológico. “Nos períodos de fase quente da ODP, parece haver uma tendência de maior frequência de valores mais elevados de precipitação diárias máximas por ano hidrológico do que na fase fria” (Queiroz, 2003, p. 70).

Silva *et al.* (2011) identificou que a atuação do ENOS e da ODP na alta bacia do Rio São Francisco (ASF), no qual está localizada a bacia do Rio das Velhas, não apresenta um sinal forte sobre os totais pluviométricos anuais observados. Ainda assim, foi observado um sinal para anomalias negativas de precipitação no leste da ASF, onde está o Rio das Velhas, quando há associação de El Niño e ODP positiva. Quando há La Niña e ODP negativa, há um aumento das chuvas no leste do ASF. Quando há sinais opostos de ENOS e ODP, há uma leve predominância dos efeitos da ODP, tendo aumento de precipitação na associação EL Niño e ODP negativa, e diminuição na associação La Niña e ODP positiva no leste do ASF. Silva *et al.* (2011) aponta ainda que esta associação ENOS-ODP responde muito bem às variações do clima na baixa bacia do São Francisco, no Nordeste brasileiro, onde a associação entre fases quentes diminuiu as chuvas e as fases frias aumentam as chuvas. O mesmo foi encontrado para outras regiões do Nordeste brasileiro por Andreoli e Kayano (2004).

Na cidade de Santa Maria (RS), Streck *et al.* (2009) observou que a ODP pode explicar parte da variabilidade interdecadal da precipitação em locais onde o ENOS explica parte da variabilidade interanual da chuva, quando há configuração de décadas com chuvas acima da normal climatológica intercaladas a décadas com chuvas abaixo da normal. Já no estado do Paraná, Nascimento Júnior e Sant’Anna Neto (2016) relataram relações fracas a moderadas entre a precipitação com o fenômeno ODP. Para as regiões Norte e Nordeste, também foram identificados indícios da influência da ODP na redução dos totais pluviométricos na Amazônia e Semi-Árido nordestino quando se configura a fase fria da ODP (SIQUEIRA e MOLION, 2007). Garcia (2006) estudou a relação entre

as ocorrências de ENOS e ODP com o Sistema de Monções da América do Sul³. Garcia (2006, p. 111) observou

[...] grande consistência entre as variáveis sobre a AS, já que, na fase negativa (positiva) da ODP ocorrida antes (depois) de 1975, o ar mais frio (quente) em baixos níveis coincide com APNMs positivas (negativas), movimento descendente (ascendente) anômalo, pares de ciclones (anticiclones) simétricos em relação ao equador à oeste da região e anomalias negativas (positivas) de água precipitável. Isso indica um enfraquecimento (fortalecimento) do SMAS na fase negativa (positiva) da ODP. O segundo modo mostrou flutuações interanuais no SMAS com os padrões das composições bem similares aos do ENOS. Portanto, conclui-se que a relação entre monção e ODP é encontrada no primeiro modo e a de monção e ENOS no segundo modo.

As variabilidades da precipitação em diferentes regiões do Brasil não podem ser explicadas somente pela atuação dos ENOS/ODP, sendo que a configuração de outros fenômenos relacionados à TSM do Pacífico e Atlântico associadas podem determinar tal variabilidade, sobretudo quando se fala do Sudeste Brasileiro.

1.3 A bacia hidrográfica como unidade de análise

A partir da instituição da Política Nacional de Recursos Hídricos, ocorrida por meio da Lei N° 9.433, de 8 de janeiro de 1997 (BRASIL, 1997), a bacia hidrográfica tornou-se unidade territorial básica de planejamento e gestão hídrica em integração com a gestão ambiental em nível nacional. A mesma legislação define a gestão sistemática dos recursos hídricos articulada à demanda humana sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade dos recursos e adequada às diversidades físicas, bióticas, demográficas, econômicas, sociais e culturais das diversas regiões do país. Portanto, este é um modelo de planejamento integrado que busca compreender os componentes ambientais e sociais do espaço no contexto de suas relações sistêmicas (PESSÔA e FAÇANHA, 2016).

Rodriguez e Silva (2013, p.72-73) definem as bacias hidrográficas como totalidades sistêmicas formadas pela interação de diversos sistemas ambientais (eco, geo

³ A circulação de monção é um dos principais sistemas atmosféricos de grande escala que atua na faixa tropical, a qual se manifesta a partir da reversão da direção dos ventos em baixos níveis durante a fase de transição entre o inverno (pouca chuva) e o verão (muita chuva). Apesar de não ser observada a reversão dos ventos na região tropical da América do Sul, ela é considerada uma região sob o regime de monção devido às outras características que definem esse tipo de regime, tais como um inverno seco e um verão chuvoso, circulação leste-oeste configurando uma brisa gigante, o estabelecimento da Zona de Convergência do Atlântico Sul, corrente de jato em baixos níveis, entre outras (Gan *et al.*, 2016).

e sociosistemas), a partir da relação entre componentes naturais, sociais, econômicos, culturais e políticos. Nelas há uma forte relação dialética entre os fatores que a compõem, entre os quais há intensas trocas de energia e matéria (BELIZÁRIO, 2014). Uma vez entendidas enquanto unidades sistêmicas, são, também, base para a concepção do planejamento de ações e gestão que visem sanar não apenas questões objetivas, mas também as demandas e expectativas da população local (MUSSETTI, 1999; RODRIGUEZ E SILVA, 2013, BOTELHO e SILVA, 2014). Sob esta perspectiva, “*a bacia hidrográfica assume uma condição de dualidade: de um lado, a realidade física; e, de outro, um campo de ação política, de gestão, tomada de decisões e partilha de responsabilidade*” (DICKEL e GODOY, 2016, p. 742).

A bacia hidrográfica é reconhecida como unidade espacial de análise na geografia física desde o fim dos anos 60, mas é a partir da década de 90 que ela é adotada em inúmeros trabalhos nas ciências ambientais, em detrimento das áreas de estudo populares nas décadas anteriores como as unidades político-administrativas, ou aquelas delimitadas por coordenadas geográficas e quadrículas definidas em cartas topográficas (BOTELHO e SILVA, 2004). Como unidade naturalmente delineada por um conjunto de terras delimitado topograficamente e drenado pelo curso de água e seus afluentes (SANTOS, 2004), a bacia pode ser delimitada a partir da definição de seu ponto exutório sobre uma base cartográfica que contenha cotas altimétricas, como as cartas topográficas, ou que permita uma visão tridimensional da paisagem, como as fotografias aéreas (BOTELHO, 1999).

Para o estudo do clima a adoção de bacias hidrográficas como recortes espaciais é oportuno por essas serem palco do ciclo hidrológico (DICKEL e GODOY, 2016). Além disso, uma vertente ou a calha de um rio, podem constituir-se em “limites” para a repercussão dos fenômenos climáticos impondo-se como controle geográfico do clima e permitindo a delimitação dos fenômenos em vários níveis a partir de seus subsistemas interativos (JARDIM, 2007; BELIZÁRIO, 2014). Assim, pode-se desenvolver estudos cujo clima é objeto central da discussão, enquanto as bacias são palco de sua repercussão seja na paisagem (KELTING, 2009), na disponibilização e gestão de recursos hídricos (COSSO *et al.*, 2020; MAGILLIGAN e NISLOW, 2007), escoamento superficial da água (SILVA e GALVÍNCIO, 2009), dinâmicas naturais do relevo e intervenção antrópica (SMITH, 2007; PEREZ, 2013, FERNANDES e SILVA, 2021), vazão superficial e segurança hídrica (MELO, 2016; COSTA, 2021), e como base para o planejamento

urbano (JARDIM, 2017), dentre outras possibilidades (BELIZÁRIO, 2014). Especialmente em relação aos mapeamentos climáticos, as bacias constituem-se na delimitação natural propícia já que permitem a análise sistêmica do clima como será exposto no tópico 1.4 (JARDIM, 2017; OLIVEIRA, 2013; OLIVEIRA e FERREIRA, 2017).

No que se diz respeito ao estudo do clima tendo a bacia hidrográfica como palco e delimitadora da repercussão das relações superfície-atmosfera, esta é uma adoção conveniente por tudo o que já foi exposto. Porém, é importante destacar que o clima é um componente contínuo que não obedece a fronteiras rígidas impostas pela necessidade metodológica de definição de limites nos estudos acadêmicos. Outras limitações se impõem ao uso da bacia como unidade de estudo, como a incongruência entre limites administrativos e limites hidrográficos, que consistem em um desafio para a gestão urbana e hídrica. Apesar disso, Zandonadi (2009) afirma que os estudos do clima com foco em bacias hidrográficas são imprescindíveis para gerar embasamento científico nas tomadas de decisões e gestão hídrica que favoreçam o melhor aproveitamento e distribuição da água nas mais variadas instâncias.

1.4 Mapeamento climático

No passado o clima já foi visto como fator determinante para a organização dos espaços geográficos e, posteriormente, como elemento passivo de ser controlado pela tecnologia, porém impossível de ser dominado (JESUS, 2008). No entanto, atualmente, o clima é um recurso e insumo natural extremamente vinculado aos processos físicos e econômicos, tornando a relação entre clima e organização do espaço dependente do grau de desenvolvimento econômico e tecnológico de cada sociedade em particular e de quais atributos climáticos são mais relevantes em cada região (JESUS, 2008).

A relação estreita existente entre os aspectos climáticos e as atividades agrárias, urbanas e industriais atestam a importância do conhecimento científico das relações clima-superfície e de suas resultantes climáticas para o gerenciamento de tais atividades (MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2002, p. 66). Assim, segundo Jesus (2008, p. 171), *“a percepção atual da complexa relação entre o meio ambiente e a sociedade passa necessariamente pelo diagnóstico de como o clima e seus elementos interferem, são modificados e ao mesmo tempo são derivados pela ação do homem”*.

A preocupação em compreender as relações entre clima e sociedade, e as influências que ambos produzem entre si, resulta no esforço de mapeamentos climáticos que visam sintetizar as principais características desse sistema, uma vez que os mapas consistem em ferramentas poderosas para os planos de ordenação espacial. Os alemães são pioneiros na produção de mapas climáticos como ferramentas de auxílio ao planejamento das cidades e para a mitigação dos problemas de poluição do ar (REN *et al.*, 2010). Sua metodologia, calcada no mapeamento diagnóstico de topoclimas, e na produção de mapas prognósticos visando a melhoria da qualidade ambiental das cidades, foi exportada para outros países europeus e, recentemente, países sul-americanos e asiáticos (REN *et al.*, 2010). A base desta metodologia é a produção de mapas matriciais contemplando características da superfície (uso da terra, função dos espaços urbanos, etc), e características climáticas (temperatura da superfície e do ar, carga térmica urbana, ventilação, etc), os quais são combinados matematicamente através da álgebra de mapas, em *software* de geoprocessamento, a fim de gerar delimitações das unidades em nível topoclimático.

No Brasil, observa-se a produção de mapas de climas urbanos que buscam abordar a organização escalar hierárquica e que, portanto, excedem o nível topoclimático levando a sínteses topo e mesoclimáticas e até de climas locais (TARIFA e ARMANI, 2000; JARDIM, 2007; ASSIS, 2010; MACHADO, 2016). Na cidade de São Paulo, Tarifa e Armani (2000) desenvolveram um estudo de mapeamento de unidades climáticas a fim de atualizar informações e integrar o projeto do Atlas Ambiental do Município de São Paulo. Os autores delimitaram e analisaram as unidades climáticas urbanas em três níveis escalares: o primeiro integrou os conjuntos de climas locais e toda a mancha urbana contínua da metrópole paulistana; o segundo nível esteve associado às unidades topoclimáticas, onde as diferenças estariam associadas aos padrões de uso da terra, bem como às diferenças constatadas na concentração dos poluentes atmosféricos decorrentes dos meso e topoclimas naturais e urbanos; o terceiro nível, associado ao habitar, viver e trabalhar, teve foco sobre os ambientes microclimáticos. A delimitação das unidades climáticas nos três níveis baseou-se na análise de mapas, dados de estações meteorológicas e sensoriamento remoto. O limite gráfico das unidades foi feito com base nas análises empreendidas pelos pesquisadores e o conhecimento técnico-científico desses sobre as relações superfície-atmosfera e suas especificidades no sítio urbano de São Paulo.

O estudo resultou em dois mapas: Unidades Climáticas Naturais e Unidades Climáticas Urbanas do Município de São Paulo. Tarifa e Armani (2000) definem os espaços climáticos naturais como um artifício analítico para melhor compreender as interações superfície-atmosfera entre as várias escalas climáticas e o acompanhamento da evolução tempo-espacial dos parâmetros meteorológicos. Os principais controles climáticos naturais para definição dos climas locais e mesoclimas foram o Oceano Atlântico, a altitude e o relevo, com as suas diferentes formas e orientações. Ao final, foram definidos cinco climas locais relacionados às características naturais da área, os quais foram subdivididos em meso ou topoclimas em função das diferentes características topográficas de cada clima local.

Jardim (2007) propôs o mapeamento de unidades climáticas em nível topo e mesoclimático na bacia do Rio Aricanduva (São Paulo) a partir de dados superfície (carta de declividades, exposição das vertentes e morfográfica), controles urbanos (albedo, condutividade térmica e uso da terra), atributos climáticos (temperatura e umidade relativa do ar). A delimitação das unidades climáticas foi feita através da sobreposição dos dados, tendo-se o enfoque sistêmico como base para a definição dos limites. O autor destacou que nas cartas onde foram retratados os topoclimas, os limites são relativamente bem definidos entre as unidades, em função da estreita relação dessas com os controles naturais e urbanos de superfície. Já nas cartas onde foram representados os mesoclimas, houve largas faixas de transição, condizentes com o grau crescente de descomprometimento da atmosfera com a superfície na medida em que se revelam escalas superiores, ganhando importância nesta escala o caráter de fluidez do ar frente à distribuição de calor e umidade.

Assis (2010) realizou o mapeamento do clima urbano de Belo Horizonte confeccionando o Mapa de Unidades Climáticas Naturais e Urbanas do município. Os limites das unidades climáticas naturais foram definidos conjugando-se informações de controle climático local e homogeneidade estatística dos parâmetros meteorológicos sobre a topografia. Assim, procurou-se identificar a influência da morfologia do terreno e da cobertura vegetal na caracterização dos topoclimas e mesoclimas da área. As unidades climáticas urbanas foram mapeadas por meio da sobreposição de diversas camadas de informações obtidas pelo autor por meio de coletas de dados em campo organizados em cartogramas, mapa de uso da terra predominante, mapa de densidade demográfica, modelo digital de elevação e o mapa de unidades naturais. A elaboração das

unidades topo e mesoclimáticas fundamentou-se na análise integrada dos fatores geocológicos que compõem o tecido urbano e as respostas termais e hídricas dos trabalhos de campo. Não foram empregados algoritmos ou pesos estatísticos na espacialização das unidades, sendo o processo de delimitação das unidades feito de forma manual, observando-se a disposição das isolinhas (isotermas, isohígras e isotacas) sobre os mapas de uso da terra, densidade demográfica e modelo digital de terreno.

Machado (2016) realizou um mapeamento de unidades de topoclima em parte da microbacia hidrográfica do córrego Estrangulado, afluente do Rio das Velhas. A metodologia incluiu o mapeamento sistemático de características geocológicas e atributos climáticos medidos *in loco* a fim de definir um diagnóstico dos elementos influenciadores do clima na área de estudo. Para fundamentar a delimitação das unidades topoclimáticas, foi elaborado um modelo matemático dessas unidades utilizando-se da metodologia de análise multicritérios.

Essa metodologia consiste em uma álgebra de mapas temáticos, os quais são classificados em categorias que recebem uma nota de acordo com a avaliação do pesquisador quanto à prioridade de relação que tem a categoria com o objeto da modelagem. Cada mapa recebe um peso em porcentagem que, no conjunto dos mapas, deve somar 100, sendo este um valor percentual. Os pesos adicionados para cada mapa temático foram definidos com base na análise diagnóstica dos dados coletados em campo, que apontou os fatores que mais se relacionavam com a distinção climática entre as diferentes localidades da área de estudo. A análise multicritérios gerou um mapa em formato matricial, o qual apresenta pixels com valores isolados (ruídos) tornando necessária a delimitação vetorial das unidades do clima. A vetorização foi feita de forma manual, considerando-se as unidades topoclimáticas apontadas pelo modelo matemático gerado, porém ajustando estas unidades às manifestações climáticas observadas ao longo do diagnóstico da área cujo modelo não foi capaz de delimitar (ex: diferenciação de topoclimas onde as características da superfície eram semelhantes, porém o comportamento climático era distinto em períodos específicos do dia) (Figura 4).

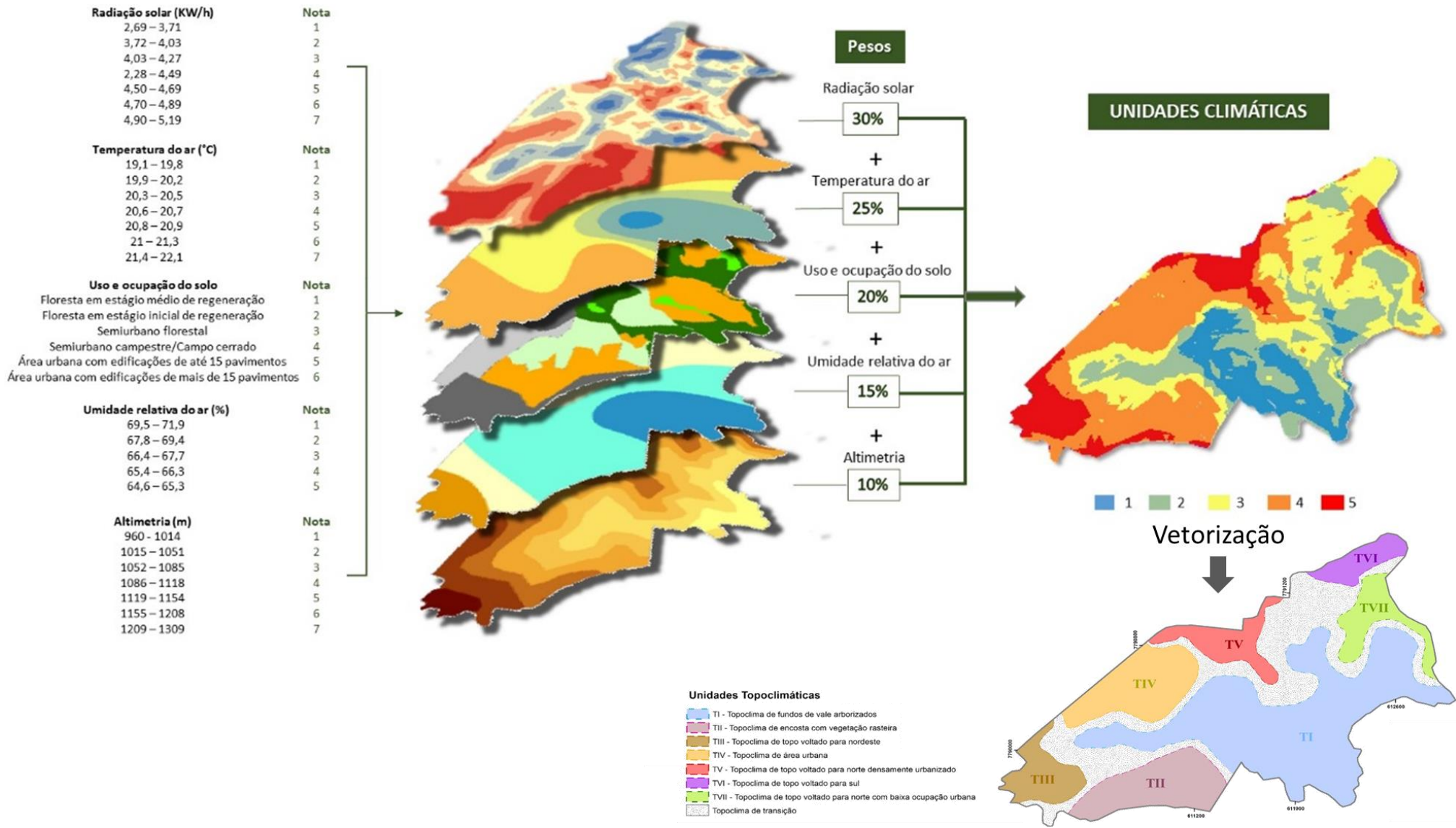


Figura 4: Metodologia de mapeamento de unidades topoclimáticas da bacia do córrego Estrangulado. Adaptado de Machado (2016).

A autora associou, ainda, a organização das escalas topoclimáticas às escalas de níveis superiores utilizando-se da análise rítmica e referências de outros trabalhos realizados na região. A associação entre as escalas climáticas foi abordada através de perfis geoecológicos e topográficos que tinham como objetivo apresentar os processos e controles climáticos na interação superfície-atmosfera. A aplicação de perfis-geoecológicos na análise ambiental foi avaliada por Levighin e Viadana (2002/2003). Segundo os autores, esta técnica complementa a necessidade de se estudar as condições ambientais de determinada área correlacionando-se os fatores socioambientais envolvidos no fenômeno geográfico e permitindo a visualização das interações em escalas diversas. Assim, os perfis-geoecológicos são recursos importantes para a interpretação e compreensão do meio ambiente, devendo estar atrelados a uma linguagem de fácil interpretação por pesquisadores de outros ramos (LEVIGHIN e VIADANA, 2002/2003).

Nota-se que o que há de semelhante entre esses trabalhos é a adoção dos preceitos de Monteiro (1976), para o qual não basta sobrepor os modelos de caracterização geoecológica e urbana, mas sim considerar, na análise geográfica, a interação desses fatores e do ritmo atmosférico, considerando-o como um sistema. Estes preceitos podem ser extrapolados para a análise sistêmica de áreas maiores que abarcam manchas urbanas, porém as extrapola. É o que se observa em estudos como o de Oliveira (2013) e Oliveira e Ferreira (2017), ambos na bacia do Rio Paraíba.

Oliveira (2013) propôs um mapeamento de unidades de paisagem na bacia do Rio Paraíba. Para compor este mapa, a autora elaborou mapas que sintetizavam características da superfície, dentre elas, o clima (Fig. 7a). Para a definição das unidades climáticas, a autora utilizou uma metodologia na qual foram produzidos mapas de temperatura da superfície, radiação global e precipitação. A autora, então, definiu pontos amostrais dentro da bacia, extraíndo os valores destas variáveis de cada ponto e atribuindo um valor de 1 a 3 a cada um desses pontos de acordo com a semelhança na variação dos parâmetros climáticos abordados entre eles. Em seguida, os valores classificados foram interpolados gerando, então, a delimitação das unidades climáticas da bacia. Neste caso, a delimitação de unidades climáticas fez-se apenas considerando os próprios parâmetros do clima adotados, ainda que estes estivessem relacionados com aspectos da superfície, como o relevo *versus* radiação global, e temperatura de superfície *versus* uso da terra.

Posteriormente, Oliveira e Ferreira (2017) conduziram um mapeamento climático em escala regional da mesma bacia. Desta vez, a metodologia, pautada no

trabalho de Nimer (1979) e de referências da modelagem de sistemas ambientais (CHRISTOFOLETTI, 1999; LANG e BLASCHKE, 2009; FERREIRA, 2014), compreendeu o levantamento e mapeamento dos controles climáticos regionais e de atributos do clima, observados sob a análise sinótica. A delimitação das unidades foi feita através da espacialização de parâmetros climáticos (temperatura da superfície, radiação solar global e precipitação), analisados junto a aspectos da superfície (relevo, cobertura da terra, posição geográfica) e a participação de massas de ar na bacia em um ano padrão habitual. A metodologia para a classificação das unidades utilizou como critério de delimitação a sobreposição dos *layers* para a análise preliminar da inter-relação entre os atributos climáticos e os controles geográficos, gerando um mapa ligeiramente diferente daquele feito em Oliveira (2013) (Figura 5). Houve, ainda, a caracterização dos atributos e controles geográficos do clima em escalas superiores à regional que abrangem a bacia em estudo.

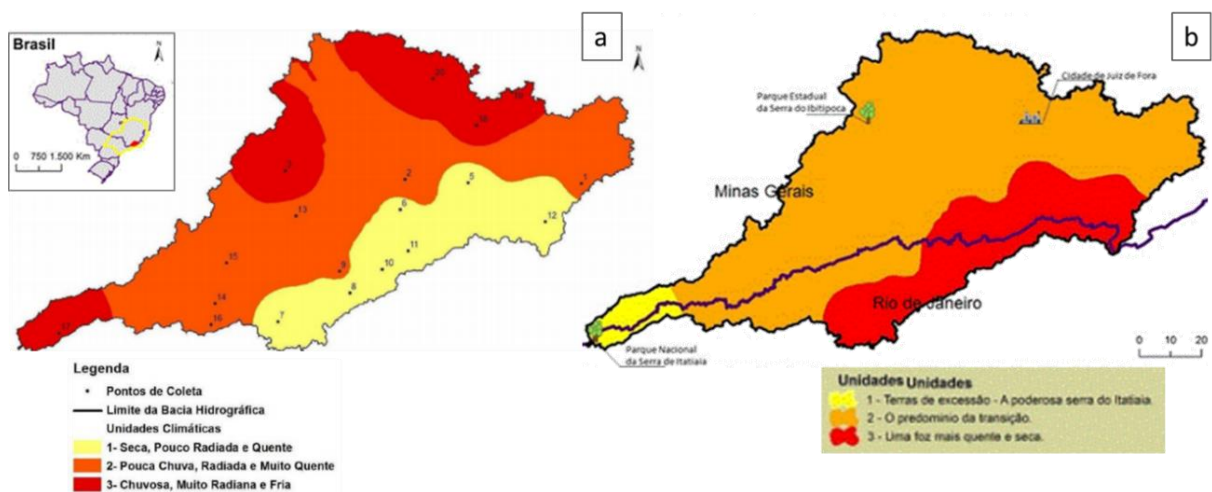


Figura 5: Mapeamento de unidades climáticas na bacia hidrográfica do Rio Paraibuna em (a) Oliveira (2013) e (b) Oliveira e Ferreira (2017).

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A análise geográfica é calcada nas relações espaço-tempo-escala. Nessa perspectiva, o clima é resultado das relações superfície-atmosfera em múltiplas escalas espaço-temporais, sob a sucessão de tempo meteorológico e cronológico. Assim, a base metodológica adotada neste trabalho propõe a análise do clima como fenômeno geográfico, conforme o esquema apresentado na figura 6.

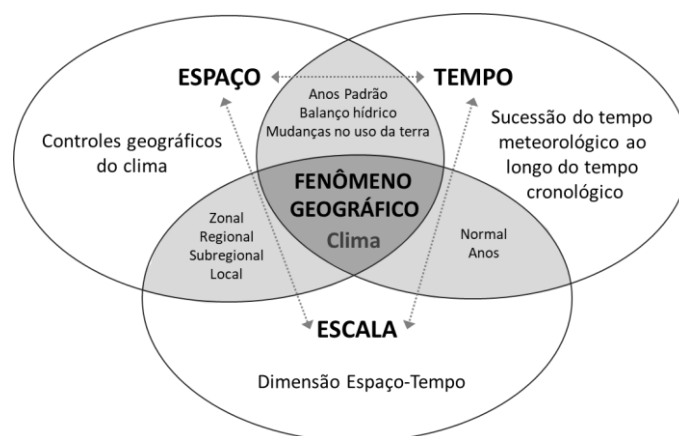


Figura 6: Método de análise proposto. Elaboração: Lilian Machado, 2019.

Na figura 6 são apresentadas as principais escolhas metodológicas para tratar as interações entre escala, tempo e espaço à luz dos fenômenos climáticos. As relações entre espaço-tempo serão abordadas através da análise de padrões, do balanço hídrico do sistema climático e mudanças no uso e ocupação da terra que podem influir sobre os atributos meteorológicos. Na intersecção entre espaço e escala serão consideradas as unidades de clima local, clima sub-regional/regional e zonal. Na intersecção escala-tempo serão analisados fenômenos na dimensão temporal de anos (variabilidade e oscilação) e décadas (normais climatológicas).

Para a realização desta pesquisa foi organizado um roteiro metodológico, apresentando as principais técnicas utilizadas para atingir os objetivos propostos (Figura 7). As etapas apresentadas nesse roteiro serão detalhadas nos tópicos a seguir.

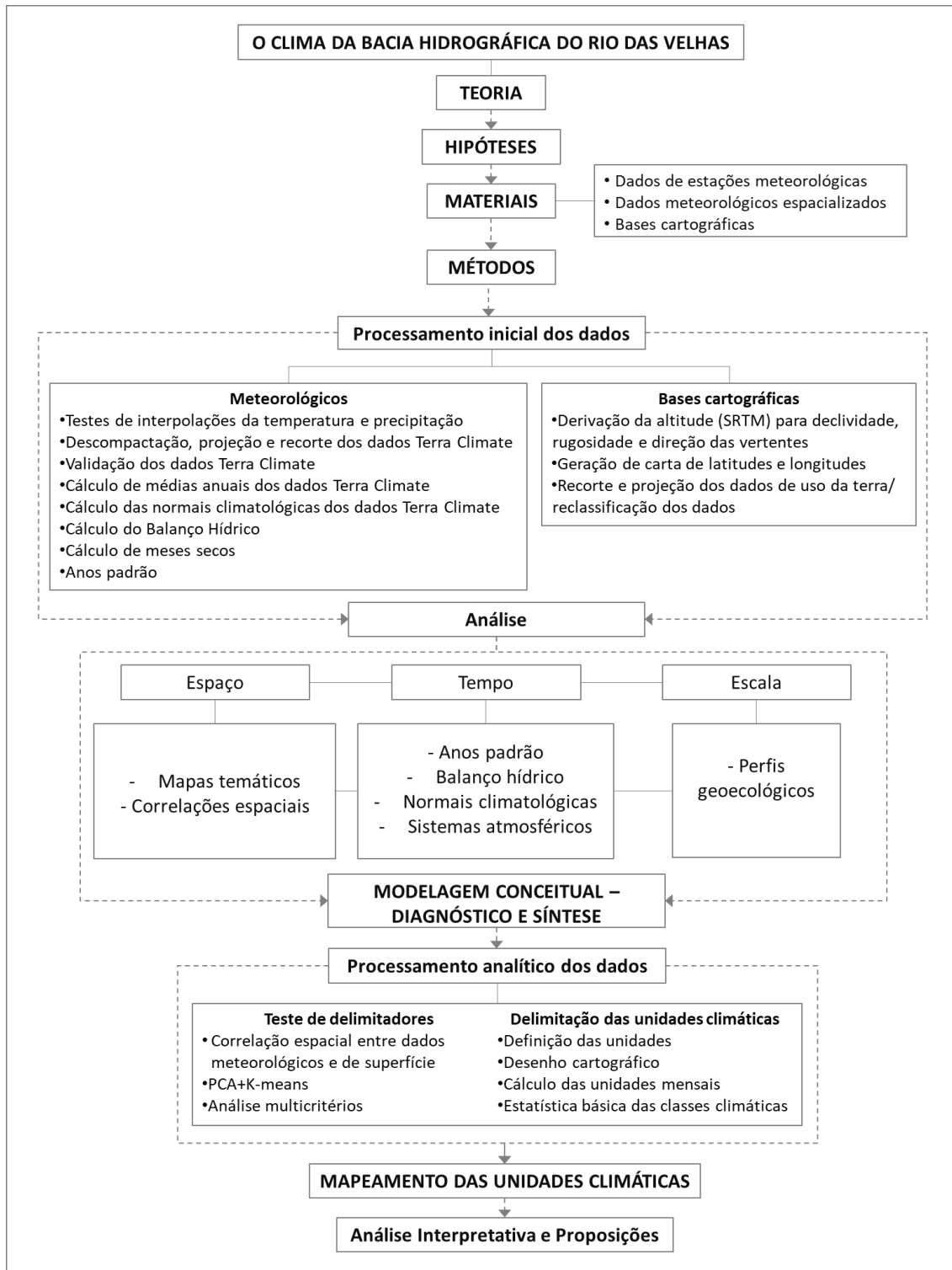


Figura 7: Roteiro Metodológico I. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

2.1 Materiais

Os materiais utilizados para realização desta pesquisa consistem em bases cartográficas, dados meteorológicos de estações oficiais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e dados meteorológicos do projeto TerraClimate.

2.1.1 Dados meteorológicos de estações oficiais do INMET

Foram obtidas as variáveis meteorológicas temperatura (média compensada, máxima e mínima) e precipitação de onze estações meteorológicas pertencentes ao INMET, em três períodos de abrangência: dados mensais de 1961-2019, normais climatológicas de 1961-1990 e normais provisórias de 1981-2010. Os dados são disponibilizados gratuitamente no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP, s.d.). As estações meteorológicas escolhidas encontram-se dentro dos limites da bacia hidrográfica do Rio das Velhas e em seu entorno em uma distância máxima de 100km (Figura 8).

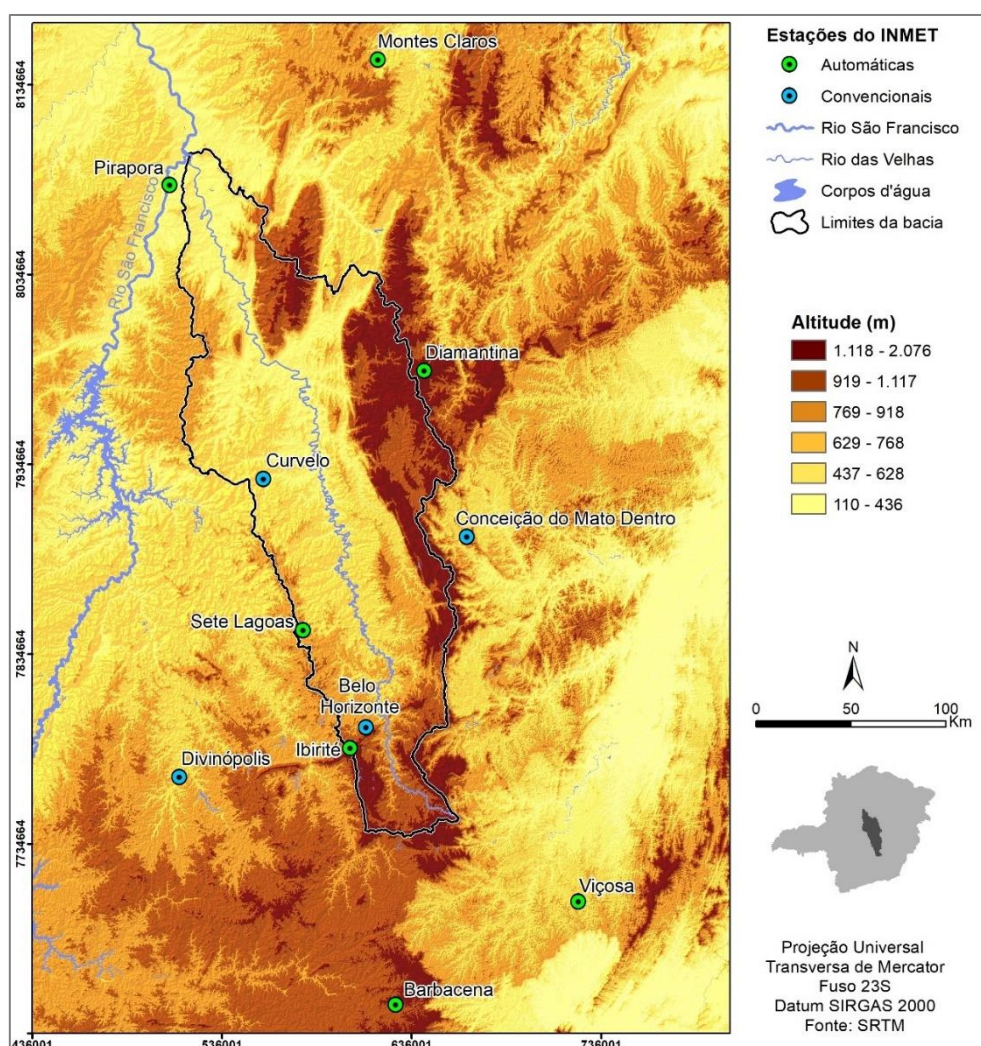


Figura 8: Estações meteorológicas na bacia hidrográfica do Rio das Velhas e entorno de 100km.

2.1.2 Dados meteorológicos matriciais

Foram obtidos dados meteorológicos provenientes do projeto TerraClimate (ABATZOGLOU, 2018). TerraClimate é um conjunto de variáveis meteorológicas e

balanço hídrico para a superfície global compreendendo a série mensal de 1958 a 2019. Os dados são disponibilizados em formato matricial⁴, com uma resolução espacial de aproximadamente 4km, sendo composto de variáveis primárias e derivadas (Tabela 3).

Tabela 3: Dados matriciais disponibilizados pelo projeto TerraClimate

Variáveis primárias	Variáveis secundárias
Temperatura máxima	Evapotranspiração de referência
Temperatura mínima	Escoamento
Pressão do vapor	Evapotranspiração real
Precipitação acumulada	Déficit hídrico
Radiação solar	Umidade do solo
Velocidade do vento	Água equivalente na neve
	Índice de aridez de Palmer
	Déficit de pressão do vapor

Adaptado de: Abatzoglou (2018).

Os dados do TerraClimate foram desenvolvidos a partir da interpolação bilinear de três bases de dados climáticos em formato matricial, cada uma delas com características espaciais e temporais distintas, a fim de se obter melhores resoluções temporais e espaciais com cobertura global (Tabela 4).

Tabela 4: Bases de dados utilizadas para produção dos dados do projeto TerraClimate

Base de dados	Resolução espacial	Resolução temporal	Variáveis*
WorldClim v2	1/24°	Mensal, normais 1970-2000	Tas, vap, pr, srad, ws
WorldClim v1.4	1/24°	Mensal, normais 1960-1990	Tas, Tmax, Tmin
CRU Ts4.0	0.5°	Mensal, 1958-2015	Tas, Tmax, Tmin, vap, pr
JRA-55	1.25°	Mensal, 1958-2015	Tas, vap, pr, srad, ws

* Temperatura média (Tas); Temperatura máxima (Tmax); Temperatura mínima (Tmin); Radiação solar (srad); Velocidade dos ventos (ws); Pressão do vapor (vap); Precipitação (pr).

Adaptado de: Abatzoglou (2018).

Os dados de precipitação e temperatura gerados pelo TerraClimate foram validados através da comparação estatística com os dados de estações meteorológicas obtidas do *Global Historical Climatology Network* (GHCN), e estações localizadas nas montanhas do oeste dos Estados Unidos das fontes *Snowpack Telemetry* (SNOTEL) e *Remote Automated Weather Stations* (RAWS). A validação apontou correlação entre as bases acima de 0,9, exceto para a variável precipitação medida pelas estações SNOTEL que mediram 0,79, o que se justifica pela heterogeneidade do terreno em que se localizam e a característica pontual da precipitação, sobretudo, a orográfica (ABATZOGLOU, 2018).

⁴ Disponível em: < <http://www.climatologylab.org/terraclimate.html>>.

2.1.3 Bases cartográficas

As bases cartográficas cumprem a função de caracterizar os controles climáticos na área de estudo e dar suporte cartográfico para apresentação dos dados gerados nesta pesquisa. Os dados, fontes e demais informações sobre as bases utilizadas neste trabalho são apresentadas na Tabela 5. Todos os arquivos foram projetados para UTM (23S) utilizando-se o datum SIRGAS 2000, atual sistema geodésico de referência brasileiro. **Á**

Tabela 5: Bases cartográficas

Dado	Fonte	Formato Original	Escala ou resolução
Modelo Digital de Elevação (MDE)	MIRANDA (2005)*	Raster	90m
Uso e ocupação da terra	MapBiomias (2019)	Raster	30m
Compartimentos do relevo	IBGE (2017)	Shapefile	
Unidades de conservação	MMA (2018)	Shapefile	
Limite da bacia	IGAM (2014)	Shapefile	1:250.000
Rede de drenagem	IGAM (2014)	Shapefile	
Limite de municípios	IBGE (2018)	Shapefile	
Sedes municipais	IBGE (2018)	Shapefile	
Outorgas de uso da água	IGAM (2021)	Shapefile	-

*Dado do SRTM - Shuttle Radar Topographic Mission.
Elaboração: Lilian Machado, 2021.

Os dados de compartimentação do relevo e de uso e ocupação da terra foram manipulados a fim de adequar as classes originais de cada um às suas relações com os parâmetros meteorológicos e para melhor caracterizar a bacia. Os compartimentos foram utilizados para caracterizar as unidades de relevo no capítulo 3 e, a partir delas, foram calculadas as variações de altitude e declividade, além da caracterização de uso e ocupação da terra. Na compartimentação original realizada pelo IBGE (2017) há treze unidades de relevo que interceptam a bacia, sendo elas apresentadas na figura 9a. A classe corpos d'água existia apenas no compartimento “Serras do Quadrilátero Ferrífero”, sendo, dessa forma, agregada a ele (Figura 9b).

Na compartimentação original a “Depressão do Rio São Francisco” é dividida em duas unidades (média e alta). Como o uso e ocupação da terra e as formas de relevo entre elas são semelhantes, ambas foram agregadas em uma única unidade denominada Depressão do Rio São Francisco.

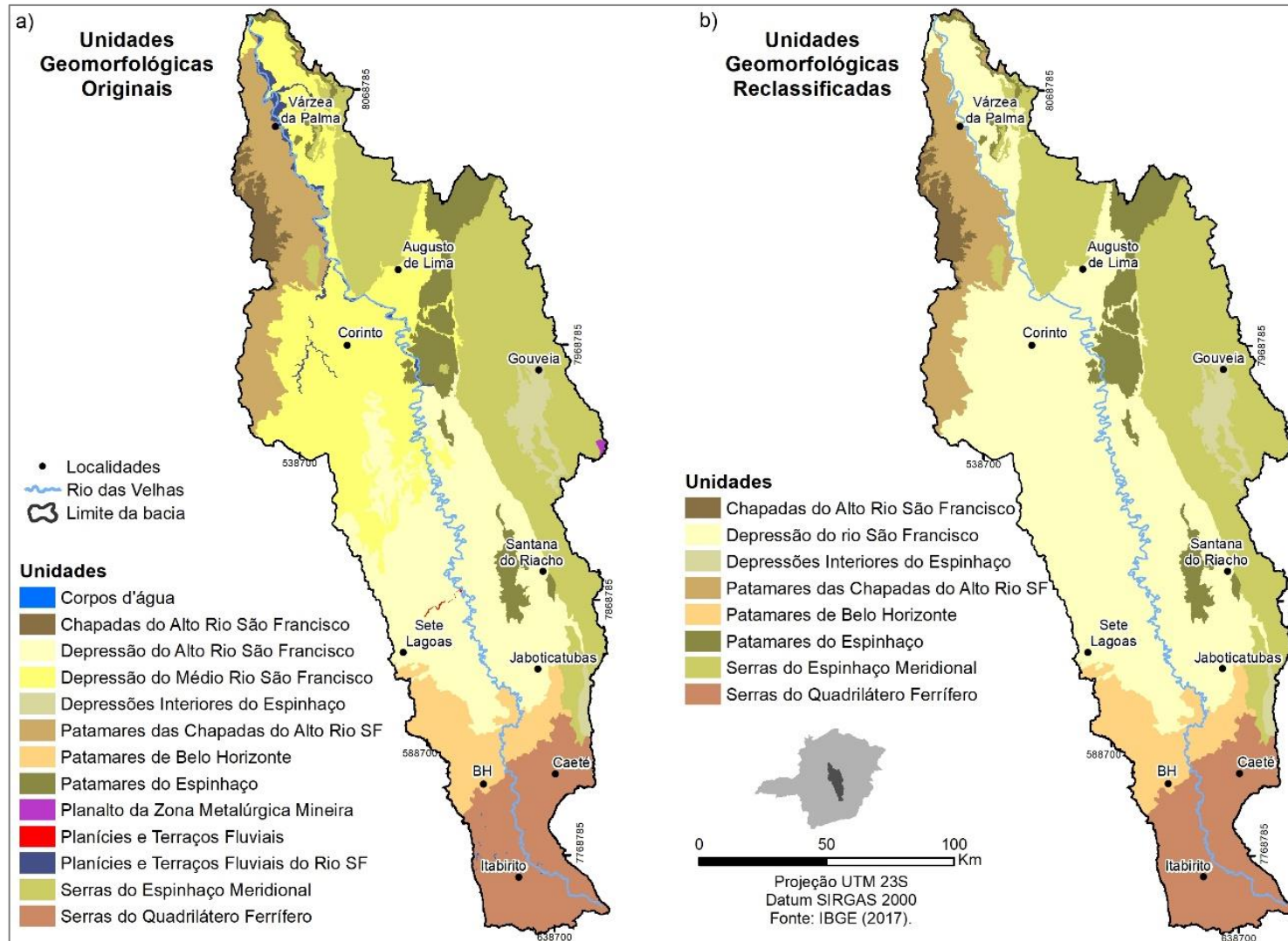


Figura 9: Unidades geomorfológicas (a) definidas pelo IBGE (2017) e (b) reclassificadas. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

Há, ainda, duas unidades de planícies na compartimentação original: as “Planícies e Terras Fluviais” e as “Planícies e Terras Fluviais do Rio São Francisco”. Como nessas unidades a variação de altitude não é expressiva em relação às unidades nas quais estão inseridas, elas foram agregadas às unidades de relevo que lhes englobava. Assim, elas foram agregadas à unidade “Depressão do Rio São Francisco”, exceto uma parte das “Planícies e Terras Fluviais do Rio São Francisco” que, próximas à cidade de Corinto, interceptavam os “Patamares do Espinhaço”, sendo agregadas a essa unidade nesse trecho. Por fim, a classe original “Planalto da Zona Metalúrgica Mineira”, que intercepta a bacia a sudeste da cidade de Gouveia, foi agregada a classe “Serras do Espinhaço Meridional” uma vez que ocupa uma área de apenas 17km² da bacia e não se diferencia em altitude e uso da terra da classe ao qual foi agregada.

2.2 Processamento inicial dos dados

Os materiais utilizados neste trabalho passaram por um processamento inicial que incluiu a validação e derivação dos dados meteorológicos para variáveis auxiliares na caracterização do clima da bacia hidrográfica do Rio das Velhas, e a derivação de dados de altitude para outras características do relevo, além da adequação dos dados de uso da terra aos objetivos do trabalho. Essas etapas são descritas a seguir.

2.2.1 Dados meteorológicos

2.2.1.1 Teste de interpolação das variáveis temperatura e precipitação

A princípio planejou-se utilizar os dados mensais das estações meteorológicas oficiais do INMET presentes na bacia e seu entorno para caracterizar e realizar as análises necessárias ao cumprimento dos objetivos deste trabalho. Inclusive, foi realizado o *download* da série e testados métodos de preenchimentos de falhas a fim de contornar problemas ao longo da série, procedimento publicado em Machado e Assis (2018). Para o entendimento da manifestação espacial das variáveis meteorológicas, os dados pontuais das estações seriam interpolados a fim de se estabelecer uma superfície contínua de distribuição das variáveis meteorológicas. Assim, foi feito um teste de interpolação para as variáveis precipitação, temperatura mínima, média e máxima a fim de se avaliar a qualidade dos dados gerados.

Para este teste foram utilizados os dados médios anuais da normal climatológica oficial do INMET de 1961-1990 para as estações meteorológicas no interior e entorno da

bacia. Foram testados para cada variável 4 métodos interpoladores disponíveis no *software* ArcGIS 10.8, sendo eles: Krigagem Ordinária, Krigagem Bayesiana, *Inverse Distance Weight (IDW)* e *Radial Basis Function (RBF)*.

Ordinary Kriging ou Krigagem Ordinária é um interpolador que permite a investigação da variável por meio de cálculos da autocorrelação espacial dos valores, sendo muito utilizado para variáveis de natureza contínua. A Krigagem utiliza modelos estatísticos que permitem uma variedade de superfícies de saída, incluindo previsões, erro padrão de predição, probabilidade e quantil. A flexibilidade do método, no entanto, exige tomadas de decisão no processamento do interpolador que requerem conhecimento do comportamento da variável analisada (ESRI, s.d.). Já a Krigagem Bayesiana calcula os parâmetros do modelo de maneira automática, utilizando-se de um processo de simulações. O que a difere do primeiro método é que, enquanto na Krigagem Ordinária assume-se que os dados devem seguir uma tendência em torno de valores médios, a Krigagem Bayesiana valoriza os desvios, tendo eles a mesma probabilidade de distribuição dos valores que se aproximam da média.

O IDW é um interpolador que determina os valores simulados utilizando uma combinação linearmente ponderada de um conjunto de pontos amostrais. O peso é a função da distância inversa (ESRI, s.d.). Este método assume que a variável sendo mapeada diminui em influência com a distância de sua localização amostrada e, por isso, é mais adequado à interpolação de variáveis de natureza pontual. O método tende a gerar "bull eyes" os quais consistem em representações concêntricas dos valores da variável interpolada.

O RBF é uma função na qual a simulação dos dados depende da distância euclidiana dos pontos utilizados, sendo útil na simulação de dados de natureza pontual (ESRI, s.d.). A diferença para o IDW consiste na simulação de uma superfície que deve passar por todos os pontos amostrais, suavizando a superfície entre eles. Há diversas funções que podem ser utilizadas, tendo sido escolhida a "thin-plate spline", a qual procura definir uma curvatura mínima da superfície simulada, reduzindo-se a simulação de valores muito distantes do mínimo e máximo calculados.

O resultado dos testes é apresentado nas figuras 10 a 13. Dada a extensão da bacia, a quantidade e a distribuição das estações meteorológicas (Figura 8), tanto visualmente, quanto os resultados estatísticos da interpolação se mostraram ineficientes

para representar a distribuição espacial dos dados meteorológicos testados. Como alternativa, foram obtidos os dados do projeto TerraClimate, descritos no tópico 2.1.2.

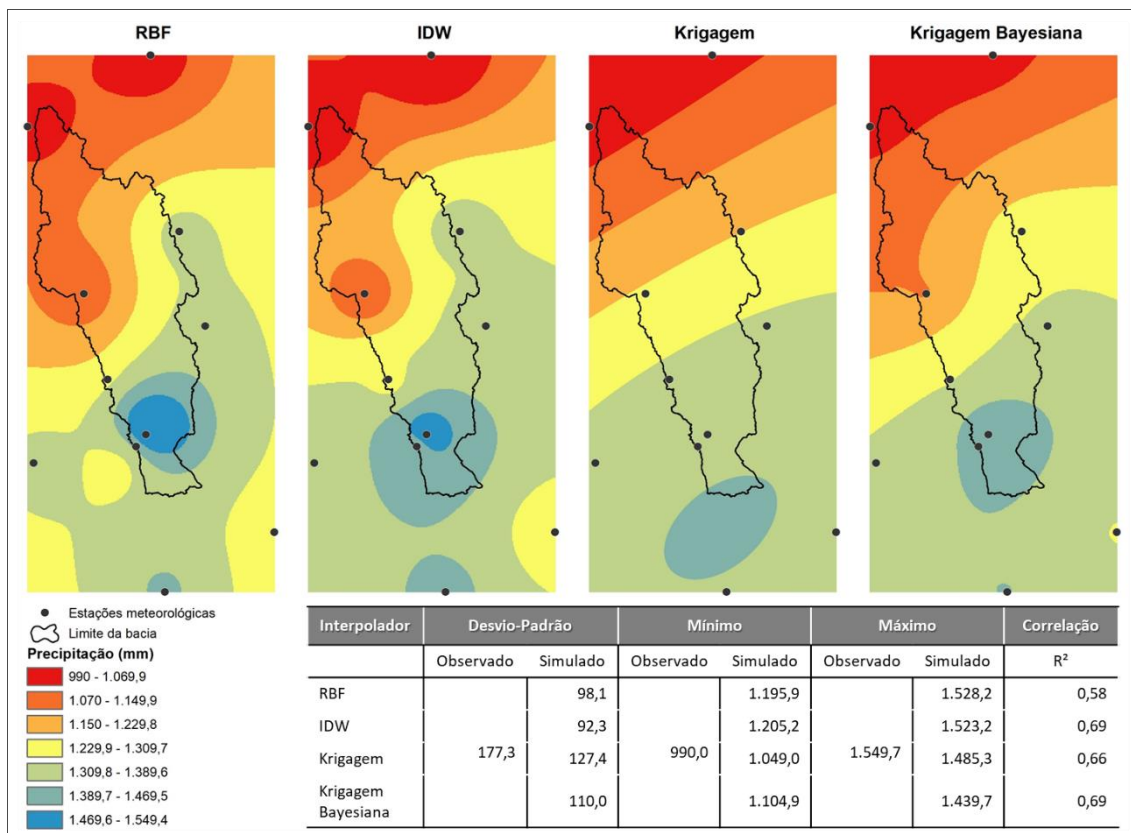


Figura 10: Teste de interpoção da precipitação. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

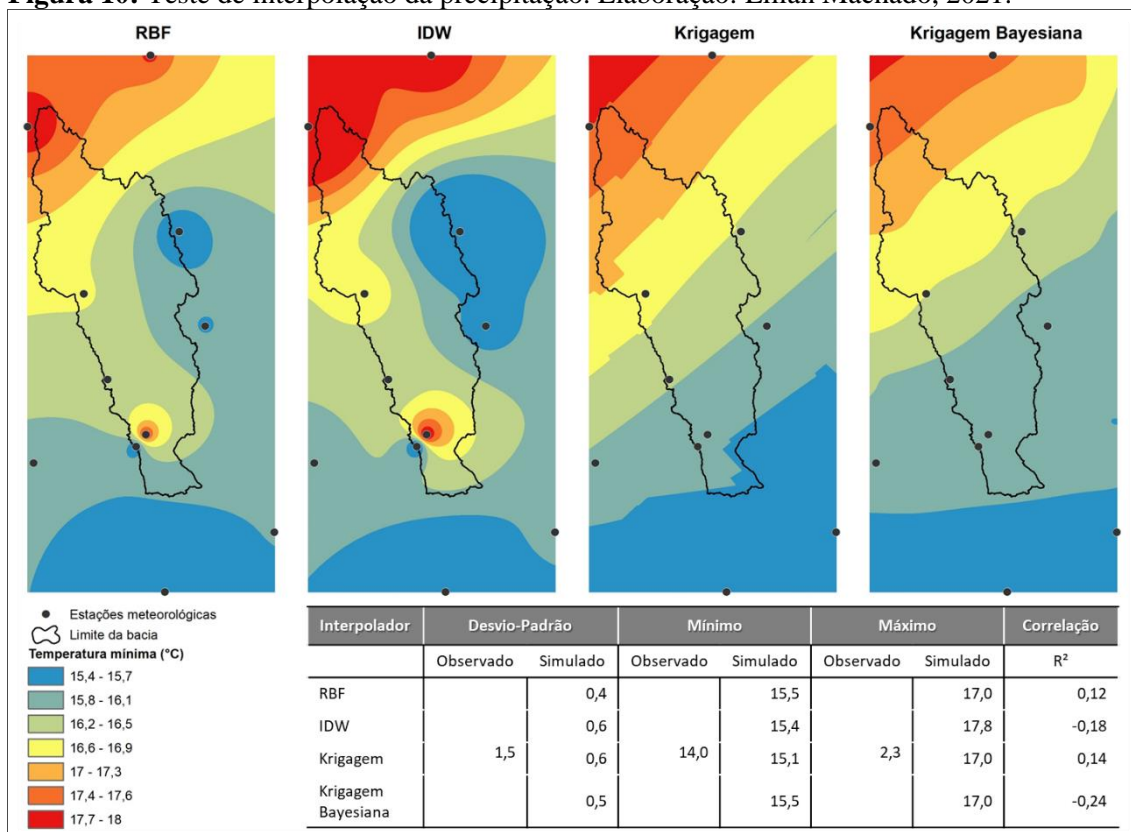


Figura 11: Teste de interpoção da temperatura mínima. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

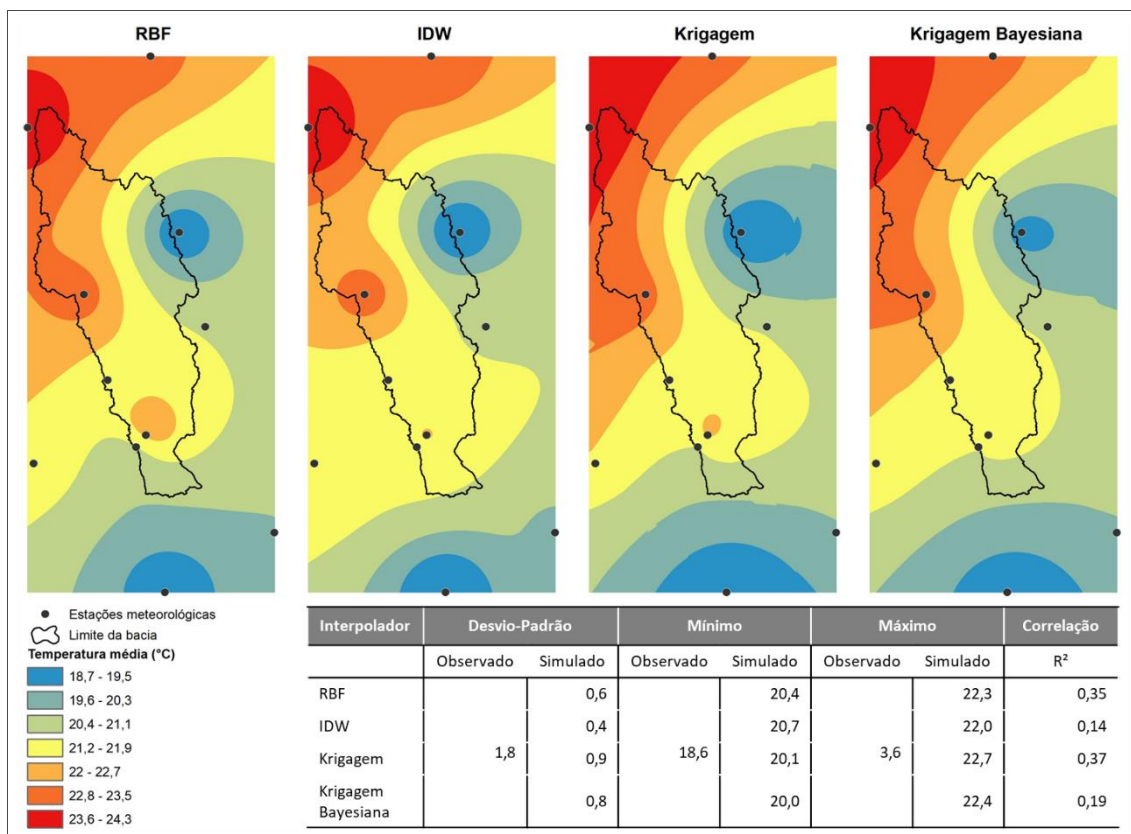


Figura 12: Teste de interpolação da temperatura média. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

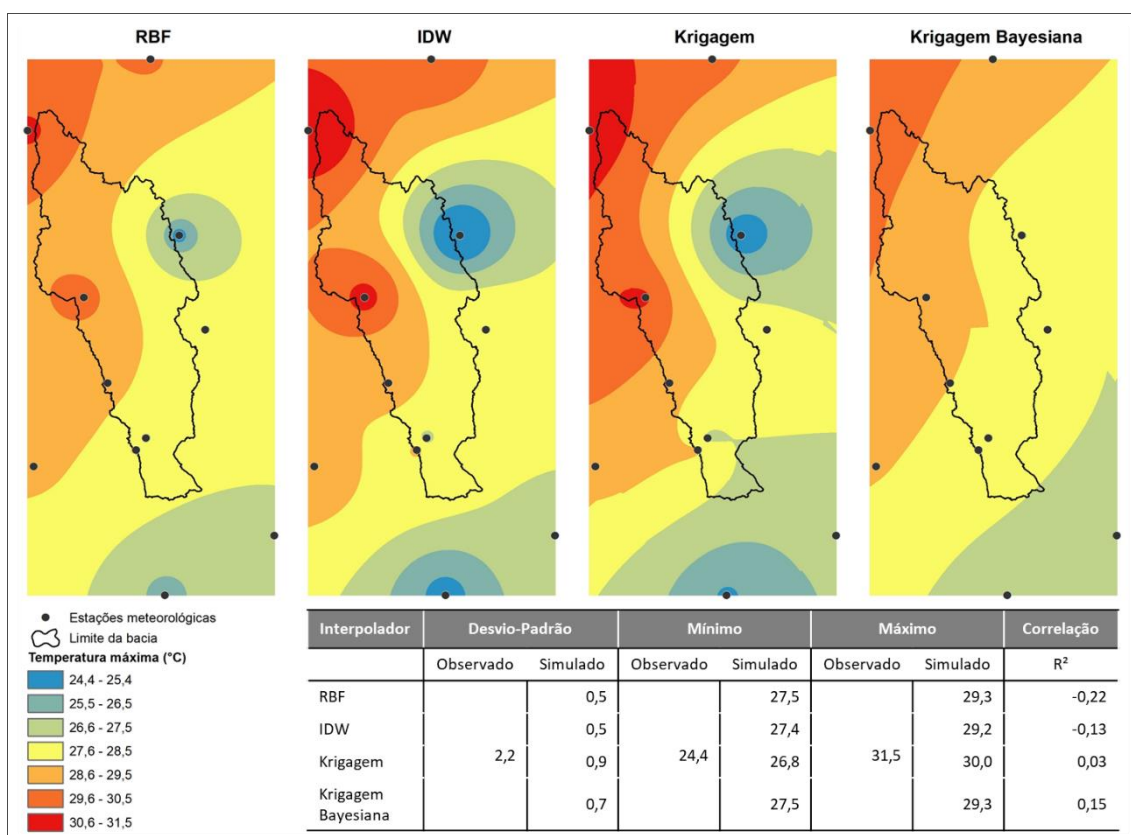


Figura 13: Teste de interpolação dos dados de temperatura máxima. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

2.2.1.2 Validação dos dados do projeto TerraClimate

Os dados de precipitação, temperatura máxima e mínima do projeto TerraClimate foram estatisticamente comparados com os dados oficiais do INMET a fim de se verificar a confiabilidade dos dados. Os dados são disponibilizados em formato netCDF (*Network Common Data Form*), o qual consiste em um conjunto multidimensional onde a dimensão consiste no tempo e a variável é o próprio atributo meteorológico. Foi feito o *download* dos arquivos netCDF por ano e por variável de 1961 a 2019. Cada arquivo possui 12 layers correspondentes aos meses do ano. Devido ao volume de dados elevado (177 arquivos e 2.124 layers) foram criadas rotinas para cumprimento dessa etapa, apresentadas na figura 14. Os modelos gerados para cada rotina podem ser visualizados no apêndice I.

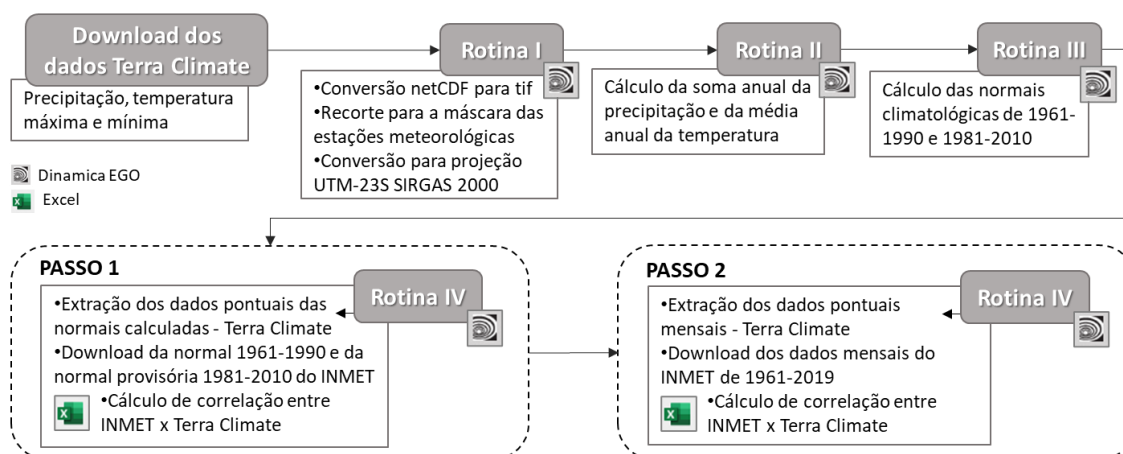


Figura 14: Roteiro de validação dos dados meteorológicos do projeto TerraClimate. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

Os dados de precipitação e temperatura máxima e mínima do projeto TerraClimate foram utilizados como amostra para comparação com os dados da normal climatológica de 1961-1990 e da normal provisória de 1981-2010 do INMET de 8 estações meteorológicas localizadas na bacia e entorno, sendo elas: Belo Horizonte, Conceição do Mato Dentro, Curvelo, Diamantina, Divinópolis, Ibirité, Pirapora e Sete Lagoas (Figura 8). Após a conversão dos dados em formato netCDF para tif, formato usual para processamento de arquivos matriciais em plataformas SIG, eles foram recortados para uma máscara que cobre a área ocupada pelas estações meteorológicas utilizadas no estudo, e projetados para a projeção UTM datum SIRGAS 2000 (Rotina I).

Em seguida, foi realizado o cálculo da soma anual da precipitação, obtendo-se os totais de chuva em milímetros para cada ano da série (1961-2019) e a média anual dos

dados de temperatura máxima e mínima (Rotina II). A partir dos dados anuais foi calculada a normal de 1961-1990 e a normal provisória de 1981-2010 (Rotina III). Por fim, foram extraídos os valores pontuais referentes à localização das estações meteorológicas sobre os arquivos normais e mensais do TerraClimate (Rotina IV), os quais foram comparados com os dados oficiais do INMET por meio da análise de dispersão e correlação em dois passos. No passo 1 foram comparados os valores mensais e anuais da normal climatológica 1961-1990 e da normal provisória de 1981-2010. No passo 2 foram comparados os valores mensais da série de dados de 1961-2019. Os resultados são apresentados nas figuras 15 a 17.

Os dados de precipitação do projeto TerraClimate apresentaram correlação acima de 95% com os dados do INMET quando comparados os dados mensais das normais climatológicas de 1961-1990 e das normais provisórias de 1981-2010. Já os totais anuais ficaram entre 83 e 86% de correlação. Os dados de temperatura mínima também apresentaram boa correlação, acima de 93% para os dados mensais e entre 81 e 90% para as normais anuais. Já os dados de temperatura máxima apresentaram correlação entre 71 e 76% para os dados mensais e 64 e 72% para os dados anuais.

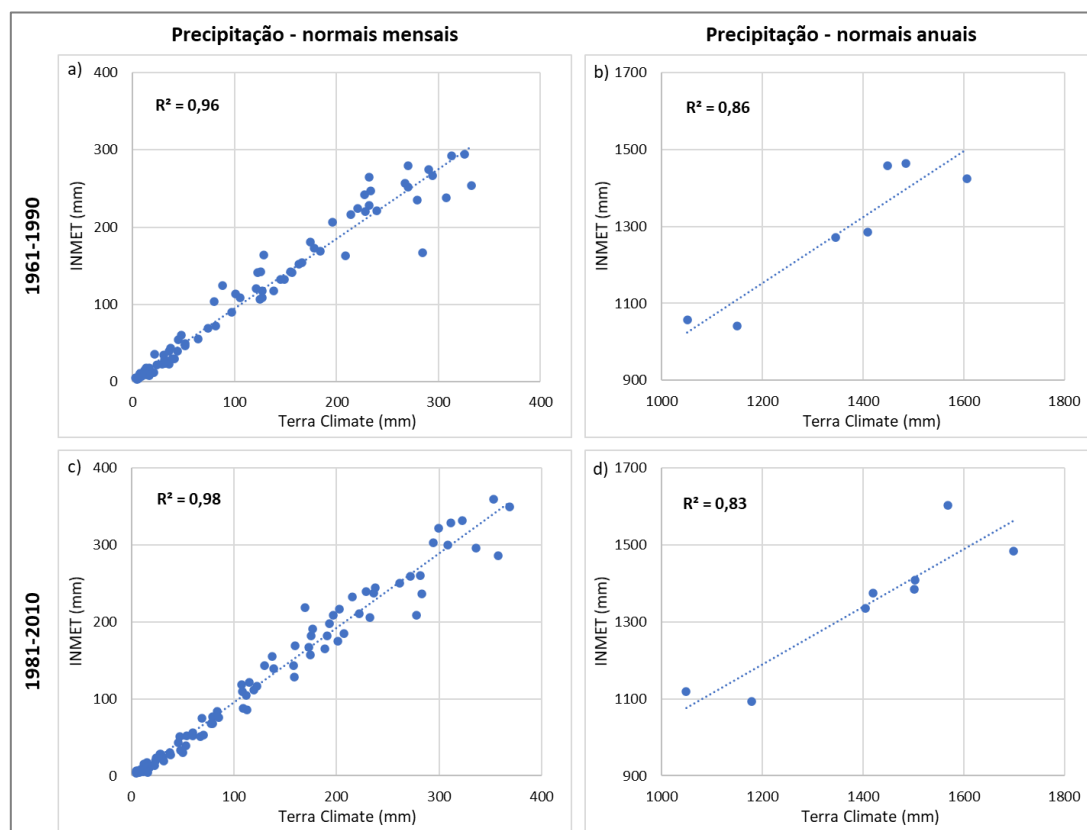


Figura 15: Índice de determinação entre os dados de precipitação das normais mensais (a) e anuais (b) de 1961-1990 e das normais provisórias (c e d) de 1981-2010. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

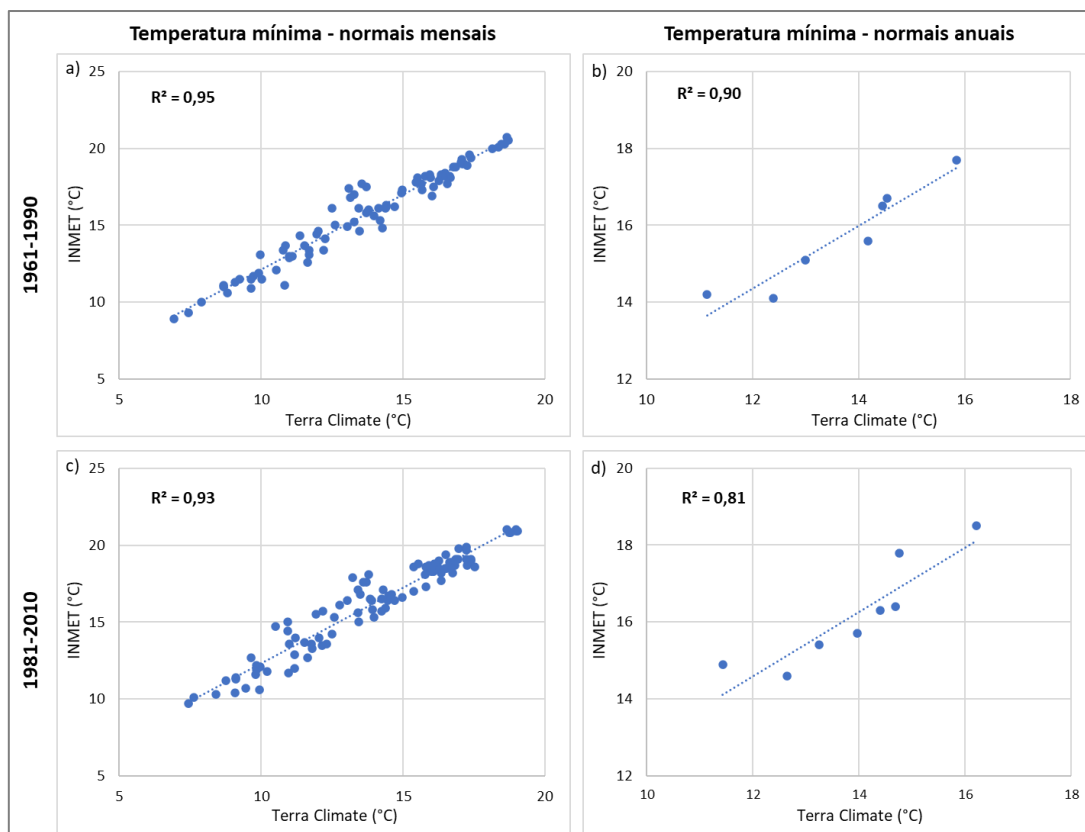


Figura 16: Correlação entre a temperatura mínima das normais mensais (a) e anuais (b) de 1961-1990 e das normais provisórias (c-d) de 1981-2010. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

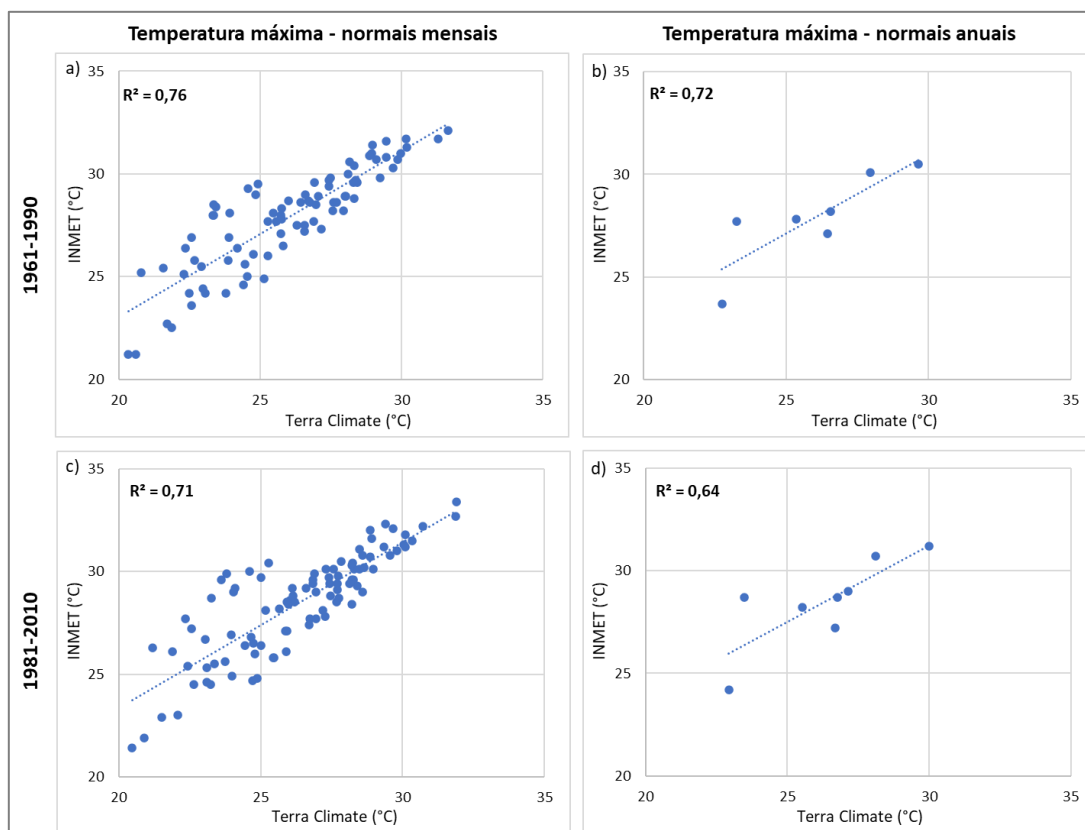


Figura 17: Correlação entre os dados de temperatura máxima das normais mensais (a) e anuais (b) de 1961-1990 e das normais provisórias (c e d) de 1981-2010. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

A correlação entre os totais mensais das séries de 1961-2019 do INMET e do TerraClimate foi semelhante. A precipitação e a temperatura mínima apresentaram correlações acima de 79%, enquanto a temperatura máxima, 67% (Figura 18).

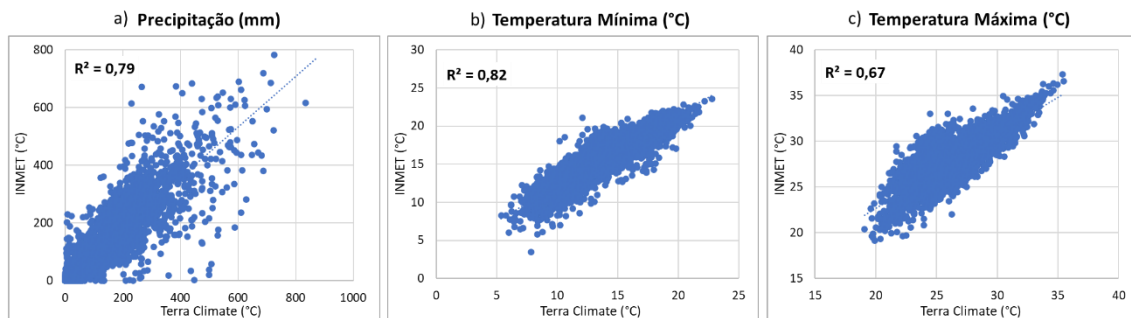


Figura 18: Correlação entre os dados mensais de (a) precipitação, (b) temperatura mínima e (c) temperatura máxima de 1961-2019. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

Para o cálculo do balanço hídrico é necessário utilizar os valores de temperatura média mensal e anual do período analisado. Como o projeto TerraClimate não disponibiliza dados de temperatura média, foram utilizados os rasters de temperatura mínima e máxima das normais calculadas para se obter o dado através da média simples (Apêndice II). Os dados foram então comparados aos dados do INEMT seguindo-se os passos da Rotina IV e do passo 1 (Figura 14). O resultado apontou um índice de determinação de 0.88 para os dados mensais e 0.78 e 0.75 para os anuais (Figura 19).

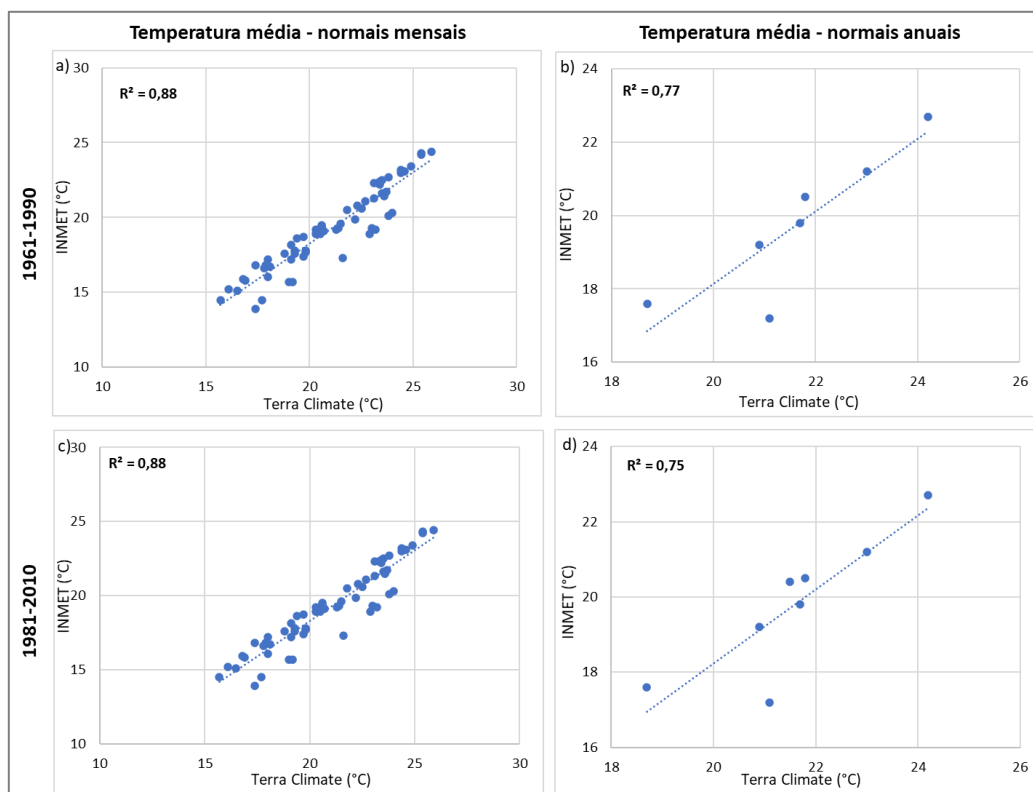


Figura 19: Correlação entre os dados de temperatura média das normais mensais (a) e anuais (b) de 1961-1990 e das normais provisórias (c e d) de 1981-2010. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

2.2.1.3 Cálculo das normais climatológicas, balanço hídrico, meses secos e anos padrão a partir dos dados do projeto TerraClimate

O cálculo das normais climatológicas, do balanço hídrico, anos padrão e dos meses secos da bacia hidrográfica do Rio das Velhas foram feitos no intuito de caracterizar o clima da bacia e embasar a definição das unidades climáticas. Como os dados TerraClimate são matriciais, eles permitem o cálculo pixel a pixel dessas características, os quais foram feitos através do *software* Dinamica EGO.

As normais climatológicas foram calculadas para o período de 1961-1990 (30 anos) e para o período de 1990-2019 (29 anos), série utilizada para definir as unidades climáticas da bacia. O cálculo foi feito através do modelo apresentados no apêndice III.

O balanço hídrico climatológico (BHC) foi calculado utilizando-se a metodologia de Thornthwaite e Mather (1955), difundida no Brasil por Camargo (1962). O BHC tem o objetivo de determinar o regime hídrico de um local sem a necessidade de medidas diretas das condições de solo. Para isso, deve-se adotar um valor médio para o armazenamento máximo de água no solo (CAD- Capacidade de Água Disponível). Neste estudo optou-se por utilizar 100 mm como CAD em função deste ser o valor padrão adotado pelo INMET para cálculo do Balanço Hídrico no Brasil.

O roteiro de Camargo (1962) define uma tabela com etapas de preenchimento para conclusão do cálculo. Esta tabela possui 12 colunas, conforme figura 20. Cada uma dessas etapas e seus cálculos associados foram incluídos em modelo desenvolvido no *software* Dinamica EGO a fim realizar o cálculo pixel a pixel e otimizar o processo. O modelo completo e suas etapas pode ser consultado no apêndice IV.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mês	T(°C)	ET _p (mm)	Cor	ETP (mm)	P (mm)	P-ETP	Neg. Acum.	ARM (mm)	ALT (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
Jan												
Fev												
Mar												
Abr												
Mai												
Jun												
Jul												
Ago												
Set												
Out												
Nov												
Dez												
Ano		-	-				-	-				

Figura 20: Tabela com as etapas para o cálculo do Balanço Hídrico Climatológico.

A coluna 1 compreende os dados de temperatura média mensal e anual das séries de 1961-1990 e 1991-2019 gerados por meio da média aritmética entre os dados de temperatura mínima e máxima disponibilizados pelo projeto TerraClimate. Como não há dados disponíveis de Evapotranspiração Potencial (coluna 4), foi necessário estimar os valores iniciando-se o cálculo pelas etapas das colunas 2 e 3. Para calcular a ETP por meio do método de Thornthwaite e Matter (1955), primeiramente é necessário obter-se a evapotranspiração potencial padrão (ET_p , mm/mês) pela fórmula:

$$ET_p = 16 \left(\frac{10T_n}{I} \right)^a \quad 0 \leq T_n \leq 26^\circ C \quad \text{Eq. 1}$$

Onde T_n é a temperatura média do mês n , em $^\circ C$ e I e a são índices que expressam o nível de calor disponível na região. Para o cálculo dos índices térmicos, aplicou-se as equações:

$$I = \sum_{n=1}^{12} (0,2T_n)^{1,514} \quad \text{Eq. 2}$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} I + 0,49239 \quad \text{Eq. 3}$$

No caso de $T_n > 26,5^\circ C$, a ET_p será dada pela equação de Willmott *et al.* (1985).

$$ET_p = -415,85 + 32,24T_n - 0,43T_n^2 \quad T_n > 26^\circ C \quad \text{Eq. 4}$$

Como o *software* Dinamica EGO permite a elaboração de equações condicionais, foi possível incluir em um único cálculo a equação correta para pixels cujos valores médios da temperatura mensal estavam entre 0 e $26^\circ C$ e aqueles cuja temperatura média do mês estava acima de $26^\circ C$. Após aplicadas as equações 1 e 4, está finalizada a etapa da coluna 2. O valor de ETP calculado, por definição, representa o total mensal de evapotranspiração que ocorreria naquelas condições térmicas, mas para um mês padrão de 30 dias, em que cada dia teria 12 horas de fotoperíodo (Thornthwaite e Matter, 1955). Portanto, para se obter a ETP do mês correspondente, esse valor de ETP deve ser corrigido em função do número real de dias e do fotoperíodo do mês, através da equação:

$$ETP = ET_p \text{ Cor} \quad \text{Eq. 5}$$

onde Cor é um fator de correção que se relaciona à latitude média da região, dado pela tabela 6. O valor de latitude utilizado foi de 20°S em função das latitudes da bacia variarem entre 17 e 20°S.

Tabela 6: Fator de Correção (Cor) da evapotranspiração em função do fotoperíodo e do número de dias do mês.

Latitude (H. Sul)	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
0	1,04	0,94	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04
5	1,06	0,95	1,04	1,00	1,02	0,99	1,02	1,03	1,00	1,05	1,03	1,06
10	1,08	0,97	1,05	0,99	1,01	0,96	1,00	1,01	1,00	1,06	1,05	1,10
15	1,12	0,98	1,05	0,98	0,98	0,94	0,97	1,00	1,00	1,07	1,07	1,12
20	1,14	1,00	1,05	0,97	0,96	0,91	0,95	0,99	1,00	1,08	1,09	1,15
22	1,14	1,00	1,05	0,97	0,95	0,90	0,94	0,99	1,00	1,09	1,10	1,16
23	1,15	1,00	1,05	0,97	0,95	0,89	0,94	0,98	1,00	1,09	1,10	1,17
24	1,16	1,01	1,05	0,96	0,94	0,89	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,17
25	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,88	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
26	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,87	0,92	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
27	1,18	1,02	1,05	0,96	0,93	0,87	0,92	0,97	1,00	1,11	1,12	1,19
28	1,19	1,02	1,06	0,95	0,93	0,86	0,91	0,97	1,00	1,11	1,13	1,20
29	1,19	1,03	1,06	0,95	0,92	0,86	0,90	0,96	1,00	1,12	1,13	1,20
30	1,20	1,03	1,06	0,95	0,92	0,85	0,90	0,96	1,00	1,12	1,14	1,21
31	1,20	1,03	1,06	0,95	0,91	0,84	0,89	0,96	1,00	1,12	1,14	1,22
32	1,21	1,03	1,06	0,95	0,91	0,84	0,89	0,95	1,00	1,12	1,15	1,23

Fonte: Adaptado de Thornthwaite e Matter (1955) e Camargo (1962).

Finalizado o cálculo da ETP (coluna 4), foram utilizados os dados de média mensal e anual de precipitação das normais de 1961-1990 e da série 1991-2019 para o cálculo do déficit ou excedente inicial do sistema, dado pela diferença da precipitação (*input* de água) pela evapotranspiração (*output* de água). O negativo acumulado (coluna 7) foi calculado iniciando-se por janeiro, para o qual considerou-se negativo zero já que o mês de dezembro já apresentava P-ETP positivo para toda a bacia. Quando uma sequência de meses com valores negativos tem fim e inicia-se os meses com valores positivos de P-ETP, é necessário conferir se o excedente inicial do sistema é o suficiente para reestabelecer o armazenamento máximo de água no solo (CAD=100mm). Se o P-ETP do mês em que se está calculando o NEG. ACUM. somado ao armazenamento (ARM) do mês anterior for superior a 100mm, então o a umidade máxima do solo foi restabelecida, o NEG. ACUM. deve ser zero e o ARM deve ser 100mm. Portanto, deve-se calcular o armazenamento (coluna 8) simultaneamente ao negativo acumulado. Para isso, o ARM do mês de janeiro foi considerado como 100mm para toda a bacia, já que

não existia negativo acumulado neste mês. O cálculo do NEG. ACUM. foi feito utilizando as condições

- Se $P-ETP_n < 0$, então

$$NEG. ACUM_n = P-ETP_n + NEG.ACUM_{n-1}$$

Eq. 6

- Se $P-ETP_n > 0$ e $(P-ETP_n + ARM_{n-1} \geq 100)$, então $NEG.ACUM_n = 0$

- Se $P-ETP_n > 0$ e $(P-ETP_n + ARM_{n-1} < 100)$, então

$$NEG ACUM_n = CAD \ln\left(\frac{ARM}{CAD}\right)$$

Eq. 7

onde n representa o mês corrente, CAD=100 e Ln consiste no Logaritmo Natural.

O cálculo do ARM foi feito através da equação

$$ARM = CAD e^{\left(\frac{NEG ACUM}{CAD}\right)}$$

Eq. 8

onde CAD=100 e e consiste no número de Euler cujo valor aproximado é de 2,718.

A alteração de água (coluna 9) foi calculada iniciando-se o mês de janeiro com valor zero, já que não há NEG. ACUM. em dezembro. A evapotranspiração real (coluna 10) consiste naquela que realmente ocorre em função da disponibilidade de água no solo. Para seu cálculo foram utilizadas as condições

- Se $P-ETP_n \geq 0$, então $ETR=ETP$

- Se $P-ETP_n < 0$, então

$$ETR = P + |ALT|$$

Eq. 9

Em seguida foi realizado o cálculo da deficiência hídrica (coluna 11), subtraindo-se ETR de ETP. Por fim, o excedente hídrico (coluna 12) pode existir quando a capacidade de armazenamento de água no solo está no limite (100mm). Assim, quando o ARM é menor que 100mm, o excedente é zero. Quando o ARM foi menor do que 100mm, o excedente foi dado por

$$EXC = (P-ETP)-ALT$$

Eq. 10

Por fim, os dados de excedente (EXC) e déficit hídrico (DEF) foram agregados em um único raster, convertendo-se os valores de déficit para negativos e então somando-se DEF e EXC.

A partir dos dados das normais de 1961-1990 e da série 1991-2019 foram calculados os meses secos a fim de se caracterizar o regime pluviométrico da bacia. Foi utilizada a metodologia de Bagnouls & Gaussen (1962) a qual determina que o mês seco é considerado aquele em que o total mensal das precipitações (quantificada em mm) é igual ou menor que o dobro da temperatura média (expressa em Celsius). Aplicada à representação gráfica, o produto dessa metodologia é conhecido como climogramas ombrotérmicos, nos quais quando a curva ômbrica (chuva) passar abaixo da térmica (temperatura), tem-se o período seco. Neste estudo, o cálculo foi realizado pixel a pixel por meio de um modelo desenvolvido no *software* Dinamica EGO, apresentado no apêndice V. Após feitos os cálculos mensais, foi contabilizado o número de meses secos ao longo do ano por pixel e gerado um mapa anual de meses secos.

A fim de avaliar a precipitação do ponto de vista de sua variabilidade, foi aplicado um procedimento para identificação de anos-padrão habituais e extremos (secos e chuvosos) definido por Monteiro (1973). Este método baseia-se no cálculo do coeficiente de variação anual da precipitação (CVa) para definir os totais pluviométricos referentes aos anos considerados normais ou não. O coeficiente é calculado a partir da seguinte fórmula:

Eq. 11

$$CVa = \frac{(Pa - Pm) * 100}{Pm}$$

onde Pa compreende a precipitação acumulada anual e Pm consiste na precipitação média do período analisado.

O resultado da equação é uma porcentagem classificada conforme Tabela 7. O cálculo foi realizado através de um modelo desenvolvido no *software* Dinamica EGO o qual pode ser consultado no apêndice VI. Os resultados matriciais foram classificados segundo os valores da Tabela 7.

Tabela 7: Classificação de anos padrão

#		
U	U	
-0,30	Inferior a -30%	Seco
-0,30	-0,15%	Tendente a seco
-0,15	0,15%	Normal
0,15	0,30%	Tendente a chuvoso
0,30	Superior a +30%	Chuvoso

Elaboração: Adaptado de Monteiro (1973).

2.2.2 Bases cartográficas

O processamento inicial das bases cartográficas visou a geração de informações que caracterizam a superfície da bacia, como declividade, direção das vertentes e rugosidade, cartas de latitudes e longitudes e a adequação dos dados de uso e ocupação da terra aos objetivos da pesquisa. O mapa de declividade da área de estudo foi importante para se observar possíveis relações entre a declividade do terreno e as variáveis meteorológicas, sobretudo a radiação e a velocidade dos ventos. A declividade foi gerada a partir do modelo digital de elevação do SRTM, com resolução de 90m, utilizando-se a ferramenta “*Slope*” do *software* ArcGIS 10.8. No entanto, como a precipitação tende a se relacionar com a rugosidade do terreno, foi aplicada a metodologia de Sampaio e Augustin (2014) para gerar um mapa de Índice de Concentração Rugosidade (ICR).

Para isso, o mapa de declividade com informações percentuais foi convertido do formato matricial para o vetorial de representação pontual, onde cada ponto contém o valor do pixel que sobrepõem (Figura 21). Em seguida, foi aplicado um estimador de densidade utilizando-se a ferramenta “*Kernel Density*” do *software* ArcGIS 10.8. Nesta etapa é necessário estabelecer o raio de busca do Kernel, no qual será realizada a soma dos valores de declividade de todos os pixels com distância inferior ao raio definido. Foi utilizado 1km², a distância de referência utilizada no estudo de Sampaio e Augustin (2014). Uma vez que a resolução espacial do MDE afeta os valores de ICR obtidos em função da quantidade de pontos somados por unidade de área, é necessário normalizar os dados gerados a fim de torná-los comparáveis, independente da resolução dos dados original. A normalização deve ser feita a partir da divisão da matriz gerada a partir do Kernel, pelo número de pixels que a área de busca do Kernel abrange. Neste caso, a normalização foi feita dividindo-se a matriz por 123, gerando-se, então o mapa do ICR.

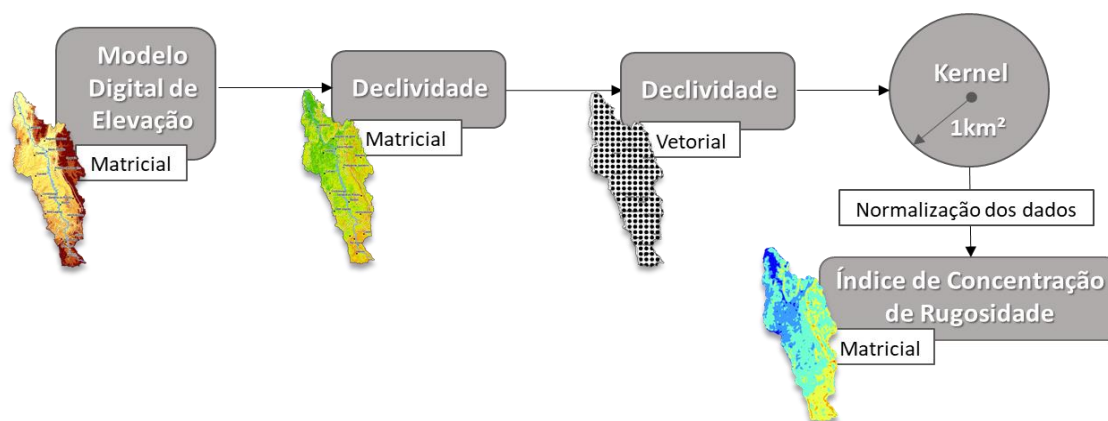


Figura 21: Roteiro de cálculo do Índice de Concentração de Rugosidade (ICR). Elaboração: Lilian Machado, 2021.

Para gerar o layout do mapa foram utilizadas as classes propostas por Sampaio e Augustin (2014), descritas na Tabela 8.

Tabela 8: Classes de ICR definidas por Sampaio e Augustin (2014)

ICR	Classe	Cor
< 2,5	Plano	Azul
2,5 a 6	Suavemente ondulado	Azul claro
6 a 14	Ondulado	Ciano
14 a 30	Fortemente ondulado	Amarelo claro
30 a 45	Escarpado	Amarelo escuro
> 45	Fortemente escarpado	Vermelho

Elaboração: Lilian Machado, 2021.

O mapa de direção das vertentes foi desenvolvido a partir do MDE utilizando-se a ferramenta “*Aspect*” do mesmo *software* ArcGIS 10.8. Foram gerados, ainda, arquivos em formato raster contendo a latitude e longitude por pixel, utilizando-se as ferramentas “Create Geodetic Latitude Map” e “Create Geodetic Longitude Map” do *software* Dinamica EGO. Esses dados foram utilizados para investigar a correlação entre eles e os dados meteorológicos na bacia.

Os dados de uso da terra da coleção 5 do projeto MapBiomass foram utilizados para caracterizar as condições atuais da bacia (2019). Os dados são disponibilizados por bioma, portanto foi feito o *download* dos arquivos em formato raster do ano de 2019 por bioma que intercepta a bacia, ou seja, Cerrado e Mata Atlântica. Os arquivos foram unificados e projetados para a projeção UTM no *software* ArcGIS 10.8, mantendo-se o Datum original, SIRGAS 2000. Por fim foi feita a reclassificação dos dados. Os dados originais possuem 15 classes que interceptam a bacia. No entanto, algumas delas, por representarem usos similares foram agrupadas e outras receberam nomes simplificados que caracterizam melhor os usos identificados na bacia. A Tabela 9 apresenta as classes

originais e as novas classes definidas para caracterização da bacia. Além disso elas foram agrupadas em coberturas nativa, antropizada, corpos d'água e áreas não vegetadas com base na própria classificação do projeto MapBiomias (2019). Por fim, os dados gerados nesse processamento inicial foram organizados em layout para análise e compreensão da interação entre eles.

Tabela 9: Reclassificação dos dados de uso e ocupação da terra

Classe original	Nova classe	Cobertura da superfície
Formação florestal	Floresta	Vegetação nativa
Formação savânica	Savana	
Formação campestre	Vegetação campestre	
Floresta plantada	Silvicultura	
Infraestrutura urbana	Infraestrutura urbana	Área antropizada
Cana	Agricultura	
Soja		
Lavoura perene		
Outras lavouras temporárias		
Pastagem	Pastagem	
Mosaico de agricultura e pastagem	Agricultura ou pastagem	
Mineração	Mineração	Corpos d'água
Rio, lago e oceano	Corpos d'água	
Afloramento rochoso	Afloramento rochoso	
Outras áreas não vegetadas	Áreas não vegetadas	

Elaboração: Lilian Machado

2.3 Modelagem cartográfica e mapeamento das unidades climáticas

A bacia hidrográfica do Rio das Velhas compreende uma extensão longitudinal significativa, ocupando 5% do território mineiro e cobrindo um espaço de transição entre os biomas Cerrado e Mata Atlântica. Dessa forma, a diversidade de paisagens e de características geológicas, exige um conhecimento profundo dessas características. Para auxiliar essa análise foram gerados mapas temáticos com as características geológicas da bacia e cartogramas com as normais anuais e mensais dos dados climáticos, além de perfis geológicos contendo os mesmos dados para um transecto de direção latitudinal da nascente à foz do rio e três transectos longitudinais cobrindo a alta, média e baixa bacia. Nesses perfis foram interpolados os dados climáticos ao longo dos transectos traçados por meio do *software Surfer*, a fim de se obter a representação espacial e temporal das variáveis nos trechos ilustrados.

A análise dos dados gerados no processamento inicial foi importante para compreensão da organização do espaço, e das conexões entre os múltiplos dados

analisados, estabelecendo-se um modelo conceitual das relações superfície atmosfera na bacia hidrográfica do Rio das Velhas. Porém, para embasar a definição das unidades foram testados dois métodos que usam do geoprocessamento na análise espacial para auxiliar na identificação de padrões na bacia: a análise multicritérios e o uso da análise de componentes principais atrelada à classificação de K-means. Ambos foram utilizados na delimitação de regiões climáticas como em Machado (2016) e Oliveira *et al.* (2021).

2.3.1 Métodos de delimitação

2.3.1.1 PCA+Kmeans

O PCA (Principal Component Analysis) é uma técnica utilizada para reduzir a dimensionalidade de um conjunto de dados, aumentando a interpretabilidade, mas ao mesmo tempo minimizando a perda de informações. Portanto, ela otimiza a análise de um conjunto de dados, preservando o máximo de informação estatística possível daqueles dados. É, ainda, capaz de separar a informação importante da redundante e aleatória.

Para definir quais variáveis seriam utilizadas no PCA a fim de gerar o mapa de unidades climáticas da bacia, foi feita, inicialmente, uma análise de correlação entre os atributos e controles climáticos (Figura 22). A correlação entre as variáveis foi calculada por meio da ferramenta “*Correlation between rasters*” do software Dinamica EGO. Essa ferramenta faz parte de um pacote do plugin BioDinamica, que engloba um conjunto de funções⁵ para análises espaciais da biodiversidade, biogeografia e macroecologia.

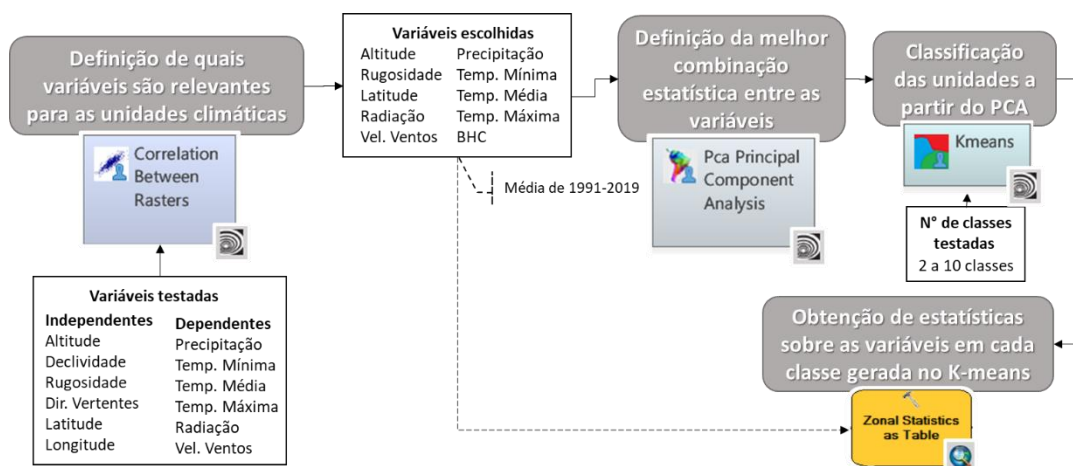


Figura 22: Roteiro de cálculo do PCA e definição dos clusters por K-means. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

⁵ As funções fornecidas incluem áreas de endemismo, riqueza de espécies, filodiversidade, endemicidade de diversidade beta, modelos de distribuição de espécies (SDMs), modelos preditivos de diversidade (GDM), interpoladores, análise espacial de ordenação (PCA, PCR, NMDS), análise estatística espacial e ferramentas para análise de conservação.

Para entrada de dados no BioDinamica, os *rasters* devem antes passar por uma ferramenta de padronização chamada “Prepare Data for BioDinamica”. Essa ferramenta padroniza todos os *rasters* para a projeção geodética Datum WGS 84. Além disso, o usuário deve definir uma máscara para recorte de todos os dados e a resolução que deve ser adotada em todos os arquivos. O dado de melhor resolução utilizado neste estudo possuem 90m de resolução espacial, resolução padrão definida para todos os arquivos utilizados na análise. A máscara compreendeu um entorno de 5km da bacia, a fim de reduzir interferências nos valores dos resultados de áreas distantes da bacia.

A função “Correlation between rasters” calcula o coeficiente de correlação simples entre um conjunto de *rasters*, resultando em uma tabela com os valores do índice de correlação de Pearson (r). Esses variam de -1 a 1, onde 1 significa uma correlação direta perfeita entre duas variáveis e -1 significa uma correlação indireta perfeita. A interpretação dos valores obtidos por categorias é comum e se dá de forma muito variada na literatura. Neste estudo adotou-se a categorização de Callegari-Jacques (2009), expressa na Tabela 10, por esta apresentar-se mais relacionada às análises de variáveis ambientais.

Tabela 10: Categorias de interpretação do Índice de Correlação (r)

Índice de Correlação (positivo ou negativo)	Interpretação
$r = 1$	Correlação perfeita
$0,9 < r < 1$	Correlação muito forte
$0,6 < r \leq 0,9$	Correlação forte
$0,3 < r \leq 0,6$	Correlação moderada
$0 < r \leq 0,3$	Correlação fraca
$r = 0$	Correlação nula

Fonte: Adaptado de Callegari-Jacques (2009).

Os dados foram correlacionados utilizando-se as normais geradas com as séries de 1961-1990 e 1991-2019 como variáveis dependentes, e características geológicas, como altitude, latitude, longitude, declividade, direção das vertentes e rugosidade da superfície como variáveis independentes.

As variáveis geológicas que apresentaram correlação forte ou muito forte com os dados meteorológicos foram a rugosidade, a altitude, a latitude e a longitude (Tabela 11). Quanto a esta última, a variação longitudinal da bacia é pequena e não justificaria uma forte influência da continentalidade ao longo de sua extensão. A correlação forte apresentada mais se relaciona ao fato de que a borda leste da bacia apresenta maiores altitudes e rugosidade que influenciam diretamente a precipitação, a

radiação solar e a temperatura do ar. A declividade e a direção das vertentes apresentaram índices de moderado a nulo, sendo descartadas para a análise do PCA.

Tabela 11: Índice de correlação entre variáveis meteorológicas e geológicas

	Período	Rugosidade	Altitude	Declividade	Direção das vertentes	Latitude	Longitude
Temperatura Mínima	1961-1990	-0.66	-0.88	-0.42	0.00	0.50	-0.67
	1991-2019	-0.67	-0.87	-0.43	0.00	0.53	-0.70
Temperatura Média	1961-1990	-0.67	-0.89	-0.43	0.00	0.49	-0.74
	1991-2019	-0.68	-0.88	-0.43	0.00	0.52	-0.76
Temperatura máxima	1961-1990	-0.67	-0.89	-0.43	0.00	0.49	-0.77
	1991-2019	-0.68	-0.88	-0.43	0.00	0.51	-0.79
Precipitação	1961-1990	0.67	0.67	0.43	-0.02	-0.83	0.77
	1991-2019	0.67	0.64	0.43	-0.02	-0.87	0.77
Radiação Solar	1961-1990	-0.64	-0.64	-0.42	0.05	0.72	-0.79
	1991-2019	-0.64	-0.62	-0.42	0.05	0.77	-0.73
Velocidade dos Ventos	1961-1990	0.67	0.75	0.43	0.00	-0.74	0.59
	1991-2019	0.66	0.80	0.42	0.00	-0.60	0.54

Elaboração: Lilian Machado, 2021.

Assim, as variáveis escolhidas para composição do PCA foram: temperatura média, máxima e mínima; precipitação; radiação solar; velocidade dos ventos; altitude, rugosidade e latitude. O balanço hídrico anual também foi incluído em função de sua importância em representar o ciclo hidrológico. Esses dados foram inseridos na ferramenta PCA do *software* Dinamica EGO. O uso e ocupação da terra foi descartado nesta análise devido à incompatibilidade entre a base matricial meteorológica e a resolução espacial dos dados de uso da terra, à pouca relação observada no diagnóstico das relações entre clima e superfície observada na análise dos resultados, e ao fato de que a ferramenta PCA não foi projetada para entrada de dados categóricos.

O PCA consiste em uma metodologia na qual os dados em conjunto passam por uma transformação linear ortogonal que converte os dados para um novo sistema de coordenadas de forma que a maior variância por qualquer projeção dos dados fica ao longo do primeiro eixo ou do primeira componente, a segunda maior variância fica ao longo do segundo componente, e assim por diante até que se atinjam o número de variáveis inseridas na análise. O *software* retorna para o usuário arquivos matriciais contendo as componentes da análise de maneira individual, neste caso, como foram utilizadas dez variáveis, foram retornados dez arquivos matriciais com a numeração do componente em cada um. A ferramenta PCA também gera dois arquivos textuais contendo a correção entre as variáveis e cada componente, e o resultado estatístico da

análise PCA. Este último, contém a proporção da variância dos dados que cada componente explica, bem como o desvio padrão e a proporção acumulado ao longo dos demais componentes (Tabela 12).

Tabela 12: Resultado da análise PCA

	Componentes									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Desvio padrão	2.81	1.03	0.67	0.48	0.44	0.33	0.24	0.16	0.05	0.03
Proporção da variância	78.8%	10.5%	4.5%	2.3%	2.0%	1.1%	0.6%	0.3%	0.0%	0.0%
Proporção acumulada	78.8%	89.3%	93.8%	96.0%	98.0%	99.1%	99.7%	100.0%	100.0%	100.0%

Elaboração: Lilian Machado, 2021.

Um componente que compreende um eixo significativo do PCA, ou seja, aquele cuja explicação da variação não é aleatória, deve responder, no mínimo, pela proporção da variância esperada média de cada eixo. No caso dessa pesquisa, se utilizamos dez eixos e eles, em conjunto, explicariam 100% da variação dos dados, então é um eixo significativo aquele que explica no mínimo uma variação de 10% dos dados (total da proporção dividido pelo número de componentes). O resultado do processamento apontou dois eixos significativos da PCA, que respondem a 89,3% da variação dos dados.

Os *rasters* correspondentes aos eixos significativos foram então utilizados para classificar as unidades climáticas da bacia através da ferramenta “Kmeans” do *software* Dinamica EGO. Essa ferramenta reproduz o método de K-means, o qual consiste em um *clustering* que objetiva particionar um número determinado de observações em grupo nos quais cada observação pertence ao grupo mais próximo da média. Para definir qual o número de cluster seria adotado foi feita a classificação de K-means para as opções de 2 a 10 *clusters*. Os resultados são apresentados na figura 23. Sobrepondo-se cada *raster* de cluster às variáveis inseridas no PCA, foram obtidos os valores de desvio-padrão, mínimo, máximo, amplitude e média de cada variável para cada cluster através da ferramenta “Zonal Statistics as Table” do *software* ArcGIS 10.8. Os resultados são apresentados no apêndice VII.

A escolha do número de classes foi definida observando-se a escala inicialmente desejada para o mapeamento (clima sub-regional), os conhecimentos obtidos na análise diagnóstica da bacia, e a variação dos valores mínimos e máximos de cada dado dentro das classes geradas. A figura 24 apresenta os valores médios para cada variável em cada classe gerada.

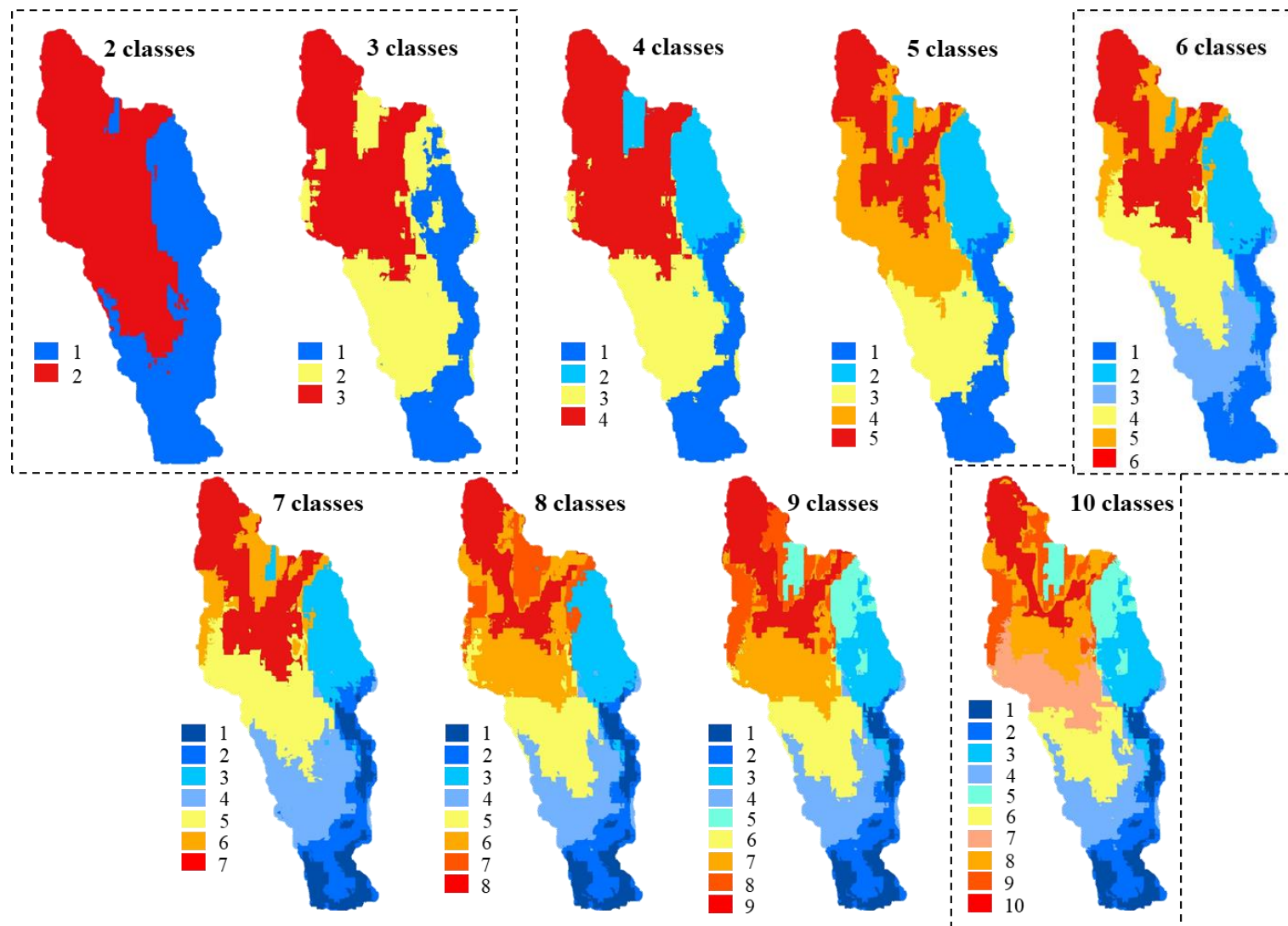


Figura 23: Clusters gerados a partir dos eixos significativos da análise PCA pelo método K-means. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

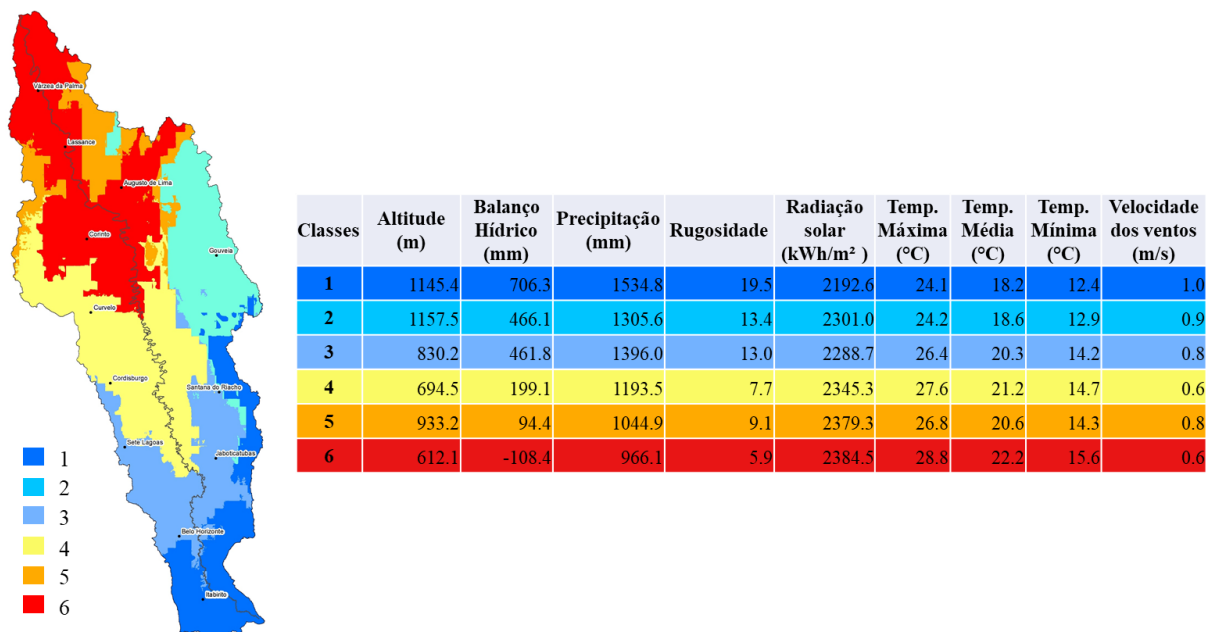


Figura 24: Classes geradas através do K-means sobre o *raster* do PCA. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

2.3.1.2 Análise multicritérios

A análise multicritérios, também conhecida como Árvore de Decisões ou como Análise Hierárquica de Pesos, consiste em uma álgebra de mapas temáticos, que permite o cruzamento de variáveis, sendo um método amplamente aceito nas análises espaciais (MOURÃO, 2007). Para que seja feita a análise, é necessário que todas as variáveis envolvidas sejam classificadas em categorias que recebem uma nota de acordo com a avaliação do pesquisador quanto à prioridade de relação que a categoria tem com o objetivo da modelagem. O pesquisador pode, por exemplo, categorizá-las de 1 a 10, onde 1 são as categorias que têm menos relação com o objeto e 10 aquelas mais relacionadas. Além disso, cada variável recebe um peso que representa sua porcentagem de participação na explicação do fenômeno em investigação. O cálculo é realizado através da média ponderada na qual é feita a soma dos produtos entre pesos e as variáveis categorizadas, divididas pela soma dos pesos que deve ser igual a 100.

Foram definidas cinco variáveis para entrada na análise multicritérios. Não foram utilizadas as mesmas dez variáveis testadas no PCA porque este número diminuiria a participação de cada variável na definição das unidades climáticas de modo a tornar insignificante a participação individual de cada uma. Assim foram escolhidas as variáveis que mais se relacionavam com as características climáticas observadas no diagnóstico da bacia, sendo elas: a altitude, a precipitação e a temperatura mínima, média e máxima.

Primeiramente categorizou-se a variável altitude. Todo o cálculo foi feito sobre um buffer de 5km do limite da bacia. Nesta área, a diferença de altitude entre o ponto mais alto e o mais baixo foi de 1.417m. Considerando-se o gradiente térmico médio do ar, segundo o qual a cada 100m de altitude a temperatura do ar diminui 0,65°C, seria esperado uma amplitude térmica na bacia de 9,2°C entre as áreas mais baixas e as mais altas. Foram definidas, então seis classes de 250m de altitude, os quais representariam um gradiente térmico esperado de aproximadamente 1,6°C. Os *rasters* de temperatura foram então divididos em intervalos de aproximadamente 1,6°C, o que resultou em 4 classes de temperatura mínima e cinco classes de temperatura máxima e média (Figura 25). Já as classes de precipitação foram definidas por meio do classificador natural breaks do *software* ArcGIS 10.8 utilizando-se cinco classes, generalização mais próxima da escala sub-regional.

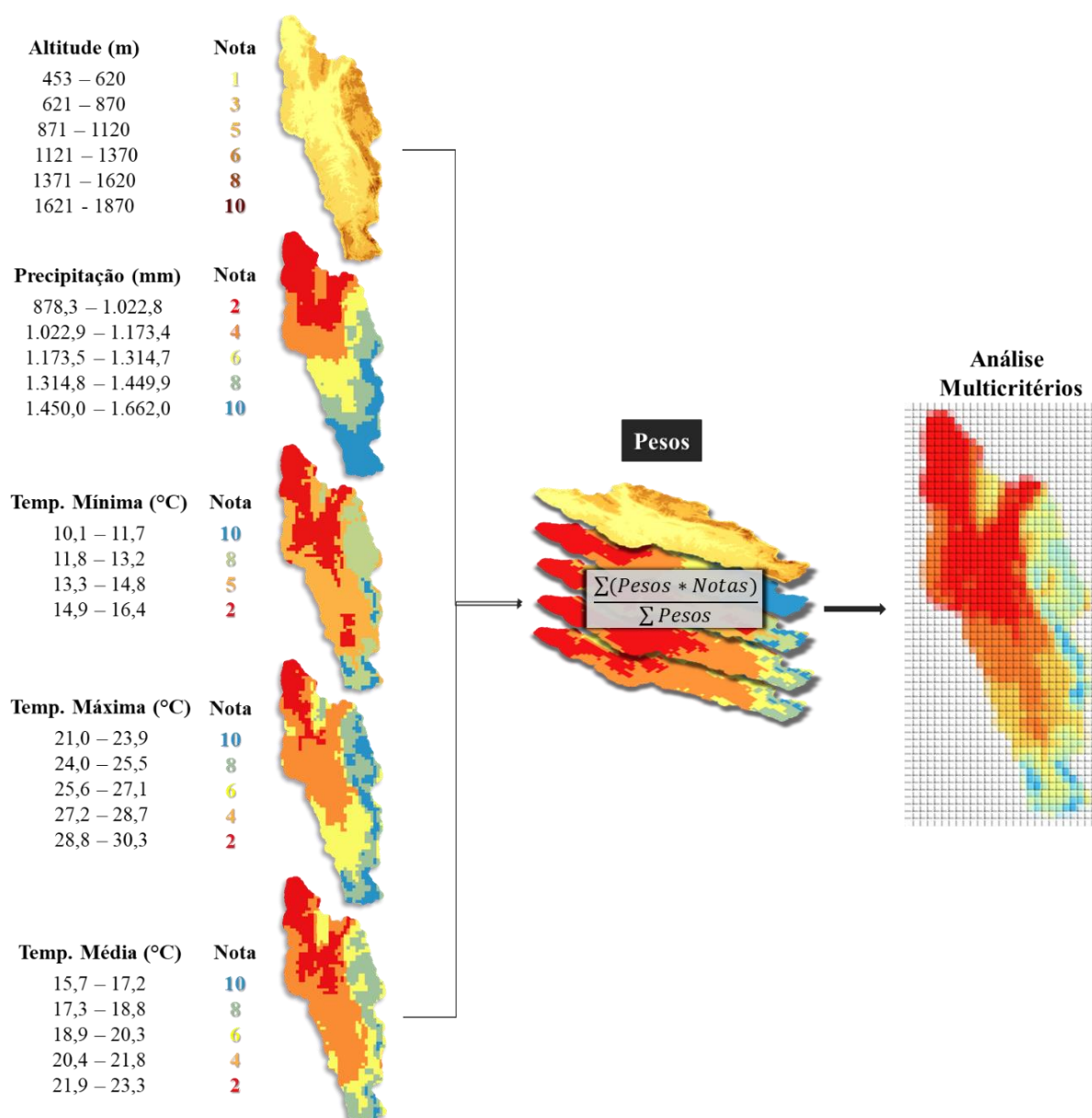


Figura 25: Categorização e notas atribuídas a cada variável. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

A ordem de importância das variáveis utilizadas foi definida com base na análise diagnóstica dos dados coletados em campo, que apontou os fatores que mais se relacionavam com a distinção climática entre as diferentes localidades da área de estudo. Assim, foram testadas quatro combinações de pesos diferentes para as variáveis da análise multicritérios, conforme figura 26. O resultado foi categorizado em 6 classes a fim de se comparar com o que foi gerado através do método PCA+Kmeans.

O resultado foi mais detalhado do que o gerado pelo PCA, o qual atendeu melhor ao mapeamento do clima sub-regional, porém foi importante por apresentar um detalhe que não ficou evidente no PCA que é a influência da região metropolitana sobre a formação de um mesoclima urbano que se inclui no clima sub-regional/local da depressão de Belo Horizonte.

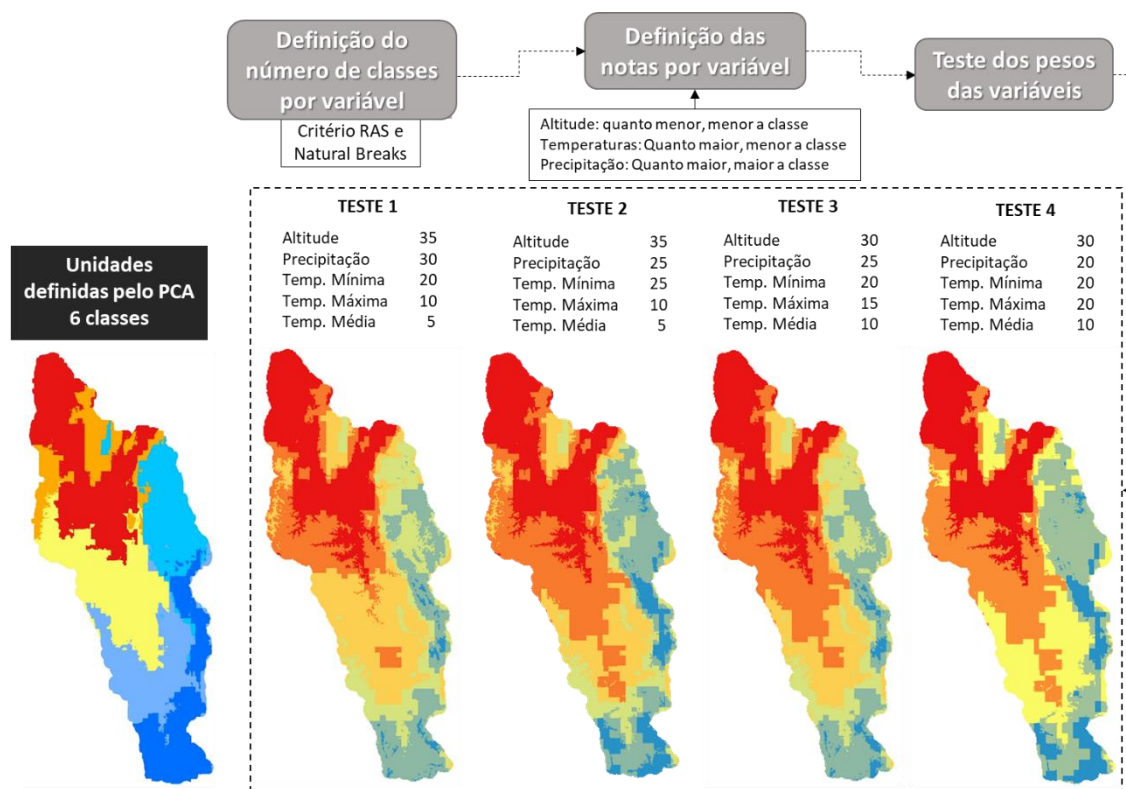


Figura 26: Pesos utilizados na análise multicritério e resultado das análises. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

2.3.2 Delimitação das unidades climáticas

Inicialmente, pretendia-se limitar o mapeamento das unidades climáticas da bacia hidrográfica do Rio das Velhas ao nível sub-regional. No entanto, uma vantagem que o uso da ferramenta PCA associada ao método K-means apresentou foi a possibilidade de visualizar uma possível divisão de escalas entre os *rasters* gerados para um nível de maior detalhe. Assim, foi

escolhido como base para a classificação das unidades climáticas o *raster* de seis classes, já que foi atestada a relação do relevo com o clima na bacia e este estava próximo da compartimentação morfológica da mesma. Porém, a partir dessa escolha foram feitas outras seleções que visaram a delimitação dos climas regionais e locais do Velhas.

Primeiramente, partiu-se da adoção do clima zonal definido por IBGE (2002) para a região que abrange a bacia, sendo ele o Clima Tropical Brasil Central. Então, foi escolhido o *rasters* de duas classes para basear a delimitação dos climas sub-regionais da bacia definidos distinguidos como Tropical Típico e Tropical de Altitude. O *raster* de três classes foi utilizado como modelo para a delimitação de uma área de transição entre essas duas unidades, onde os valores médios das variáveis meteorológicas. A delimitação dos contornos de cada unidade foi feita a partir da vetorização manual no *software* ArcGIS 10.8.

O *raster* de seis classes serviu para uma aproximação sobre as possíveis unidades sub-regionais da bacia. Para que fosse feito o desenho dessas unidades foi adicionada uma coleção de mapas no *software* ArcGis 10.8 contendo as bases cartográficas utilizadas na entrada da análise e o mapa resultante dela. A partir da sobreposição dessas informações e dos conhecimentos obtidos por meio da análise diagnóstica do clima da área, foram vetorizadas as unidades climáticas sub-regionais. Apesar do produto do método PCA+Kmeans nortear a delimitação dos climas, algumas considerações observadas no diagnóstico realizado no capítulo 4 fundamentaram a escolha de desmembrar as unidades 1 e 5 do raster de seis classes em dois climas sub-regionais, e agrupar parte da unidade 5 ao clima sub-regional da Serra do Espinhaço. Por fim, o raster de dez classes foi utilizado como base para a definição de unidades locais do clima na bacia do Rio das Velhas, utilizando-se da sobreposição desse produto à coleção de mapas utilizada no passo anterior.

Por fim, foram elaborados dois blocos-diagramas e dois perfis geocológicos que representam os controles geográficos dos climas sub-regional e local, respectivamente. Os blocos-diagramas apresentam as diferenças entre os meses de verão e inverno, apresentando os totais pluviométricos e médias térmicas de pontos localizados nos climas sub-regionais para o trimestre mais seco e mais chuvosos do ano. Os perfis geocológicos apresentam as médias dos atributos meteorológicos calculadas pela ferramenta “*Zonal Statistics*” do *software* ArcGIS 10.8, incluindo o balanço hídrico. Os dados de outorgas do IGAM (2021) também foram organizados por unidade climática local.

2.4 Conceitos e Taxonomia escalar

Para discutir a configuração das unidades climáticas regionais da bacia hidrográfica do Rio das Velhas é necessário, antes, esclarecer os conceitos adotados nesta pesquisa. Como observado na fundamentação teórica desse trabalho alguns conceitos relacionados à taxonomia escalar na climatologia apresentam significados diversos de acordo com a linha teórica adotada e os objetivos da análise ambiental. Assim, a hierarquia adotada nesta pesquisa obedece aos critérios propostos por Ribeiro (1993) que se resumem ao princípio de que as escalas climáticas se organizam dos níveis superiores aos níveis inferiores, sendo as primeiras, mais próximas do nível planetário, influenciadas pela radiação solar, enquanto as últimas, mais próxima dos habitantes terrestres, sofrem a influência direta das características da superfície, inclusive da ação antrópica. A interação entre as escalas pressupõe, primeiramente, que o atributo tridimensional do clima e que as repercussões das interações físicas em níveis superiores resultam em modificações sucessivas em níveis inferiores, enquanto os processos ocorridos em níveis inferiores possuem uma repercussão limitada nas escalas acima (RIBEIRO, 1993).

Embora não seja possível delimitar com precisão as dimensões espaciais de abrangência de determinada escala climática, pode-se definir regiões ou áreas nas quais o comportamento dos parâmetros meteorológicos seja relativamente homogêneo, caracterizando uma região ou unidade climática. Conforme mencionado no capítulo 1, Monteiro (1991) ressalta que a hierarquia das escalas climáticas diversifica funções entre os diferentes níveis escalares atribuindo à escala zonal o papel diversificador do clima, organizador à escala regional e de especialização ao nível local. Considerando o exposto, para este trabalho adotou-se as seguintes unidades escalares do clima:

- **ÁClima Zonal:** abrange a circulação geral da atmosfera e os principais controles que atuam na organização climática são a latitude, a distância dos oceanos, o movimento de rotação da Terra e a sucessão de sistemas atmosféricos que compõem o ritmo anual das zonas. O mapa de climas do Brasil disponibilizado por IBGE (2002) define o clima Tropical Brasil Central como a unidade zonal onde a bacia hidrográfica do Rio das Velhas se insere.
- **ÁClima Regional:** embora os controles que o definem sejam semelhantes aos do clima zonal, sobretudo no que diz respeito a sucessão de sistemas atmosféricos responsáveis pelo ritmo sazonal e mensal dos principais atributos climáticos, grandes unidades de relevo influem sobre a amplitude dos dados meteorológicos. Na bacia do Velhas essas

unidades diferenciam-se pelas superfícies altas e rugosas do Quadrilátero Ferrífero e da Serra do Espinhaço em contraponto às terras rebaixadas e planas da Depressão do Rio São Francisco que geram perfis térmicos e pluviométricos distintos, ainda que abrangidos na característica principal de sazonalidade do clima tropical.

- **ÁClima Sub-regional:** submetidas às características principais dos climas regionais, as unidades sub-regionais distinguem-se pela influência que compartimentos de relevo homogêneos causam sobre a atmosfera, gerando unidades onde a altitude e a rugosidade da superfície definem os aspectos médios dos atributos climáticos.
- **Á Clima Local:** neste nível, a integração entre aspectos geocológicos como altitude, latitude e orientação do relevo são fundamentais para gerar áreas onde a variação dos atributos climáticos é mais ou menos intensa do que aquela atribuída a unidade sub-regional.

3. A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS

A bacia hidrográfica do Rio das Velhas localiza-se na região central do estado de Minas Gerais, ocupando uma área de drenagem de aproximadamente 28 mil km² (Figura 27). A bacia compreende 51 municípios, dos quais 44 têm as sedes urbanas dentro dos limites, totalizando uma população residente de cerca de 4,4 milhões de habitantes (IBGE, 2010).

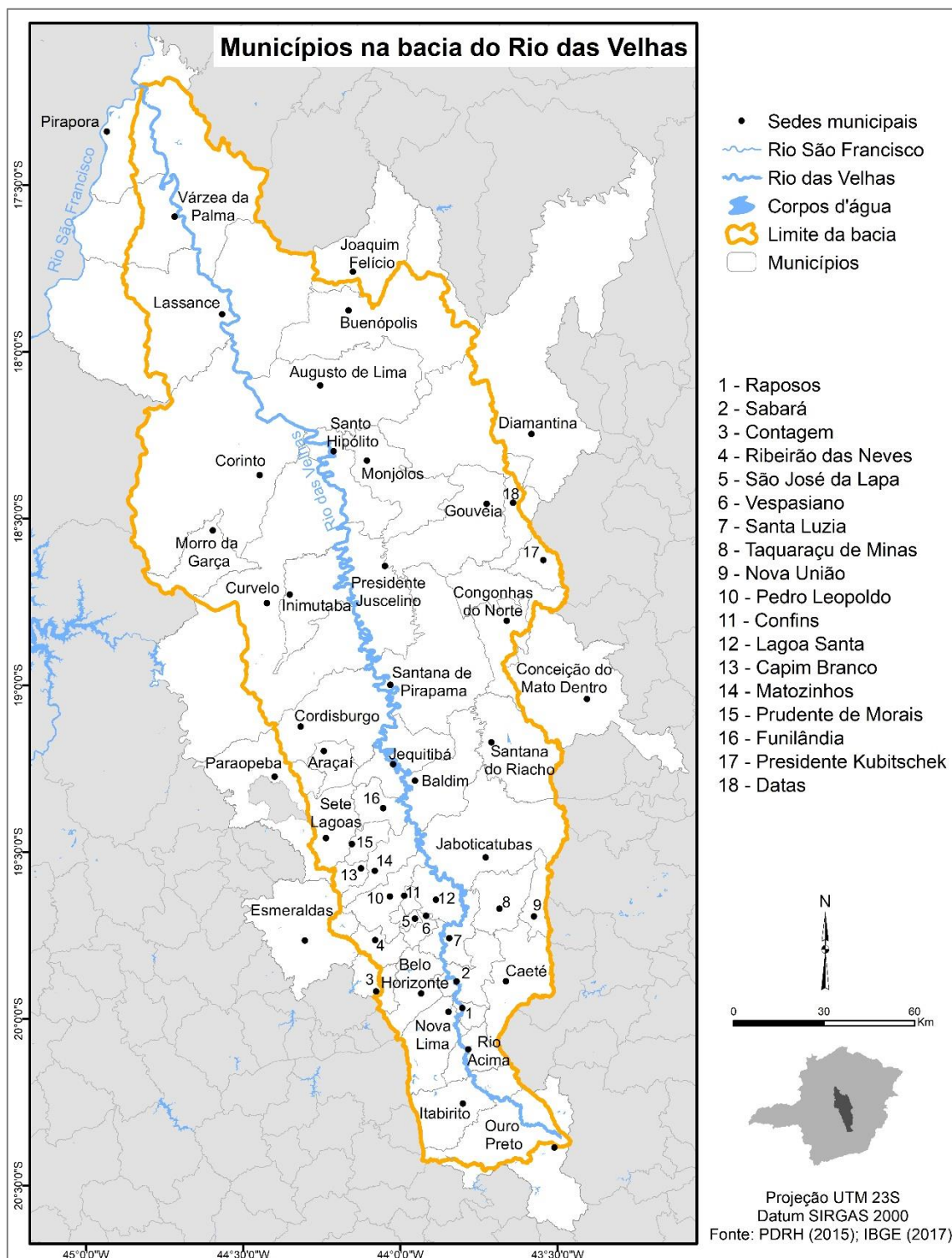


Figura 27: Bacia hidrográfica do Rio das Velhas. Elaboração: Lilian Machado, 2019.

Aproximadamente 85% da população está concentrada na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), que ocupa uma área de 20% do território da bacia (Figura 28). A densidade demográfica na maior parte da bacia está abaixo de 40 hab/km². Somente na RMBH ela é expressiva, alcançando aproximadamente 7.200 hab/km² na capital. O Rio das Velhas é responsável pelo abastecimento de 75% da população de Belo Horizonte e 45% de toda a RMBH. A demanda hídrica concentrada preocupa o Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas (CBH-Velhas), uma vez que durante o período de estiagem natural das áreas próximas à nascente do rio, que tem seu ápice de junho a setembro, a vazão do rio fica comprometida, colocando em risco o abastecimento (OLIVEIRA, 2018).

A população é majoritariamente urbana, com apenas 3% do total da população residente em áreas rurais (IBGE, 2010). Nos municípios da margem direita do Rio das Velhas o percentual da população rural é maior nas áreas centrais da bacia e próximas à foz (Figura 28). Nessas, a demanda por água é direcionada em maior parte para atividades agropecuárias, as quais dependem diretamente das chuvas para um bom desempenho ou indiretamente por meio da vazão do rio.

O Rio das Velhas é o afluente de maior extensão da bacia do Rio São Francisco com 806,4km da nascente, no município de Ouro Preto, até a foz, no distrito de Barra do Guaiçuí, município de Várzea da Palma (PDRH, 2015). O rio nasce na altitude de 1.500m e desagua a 478 m, sendo a bacia subdividida em Alto, Médio e Baixo Rio das Velhas (Figura 28).

O Alto Rio das Velhas compreende todo o Quadrilátero Ferrífero, tendo o município de Ouro Preto como o limite ao sul e os municípios de Belo Horizonte, Contagem e Sabará como limites ao norte (COSTA, 2008). Esta região apresenta o maior contingente populacional e percentual de população urbana, além de intensa movimentação econômica industrial e minerária, responsáveis pela ejeção de esgotos nas calhas dos rios e de efluentes gerados por atividades minerárias irregulares nessa parte da bacia (PDRH, 2015). Segundo levantamento feito para a elaboração do Plano Diretor de Recursos Hídricos (PDRH) da bacia do Rio das Velhas (PDRH, 2015), algumas estações de amostragem de qualidade da água em cursos d'água na região do Quadrilátero Ferrífero apresentam concentração de metais (cobre, manganês e níquel) e sólidos em suspensão resultantes da atividade minerária na região.

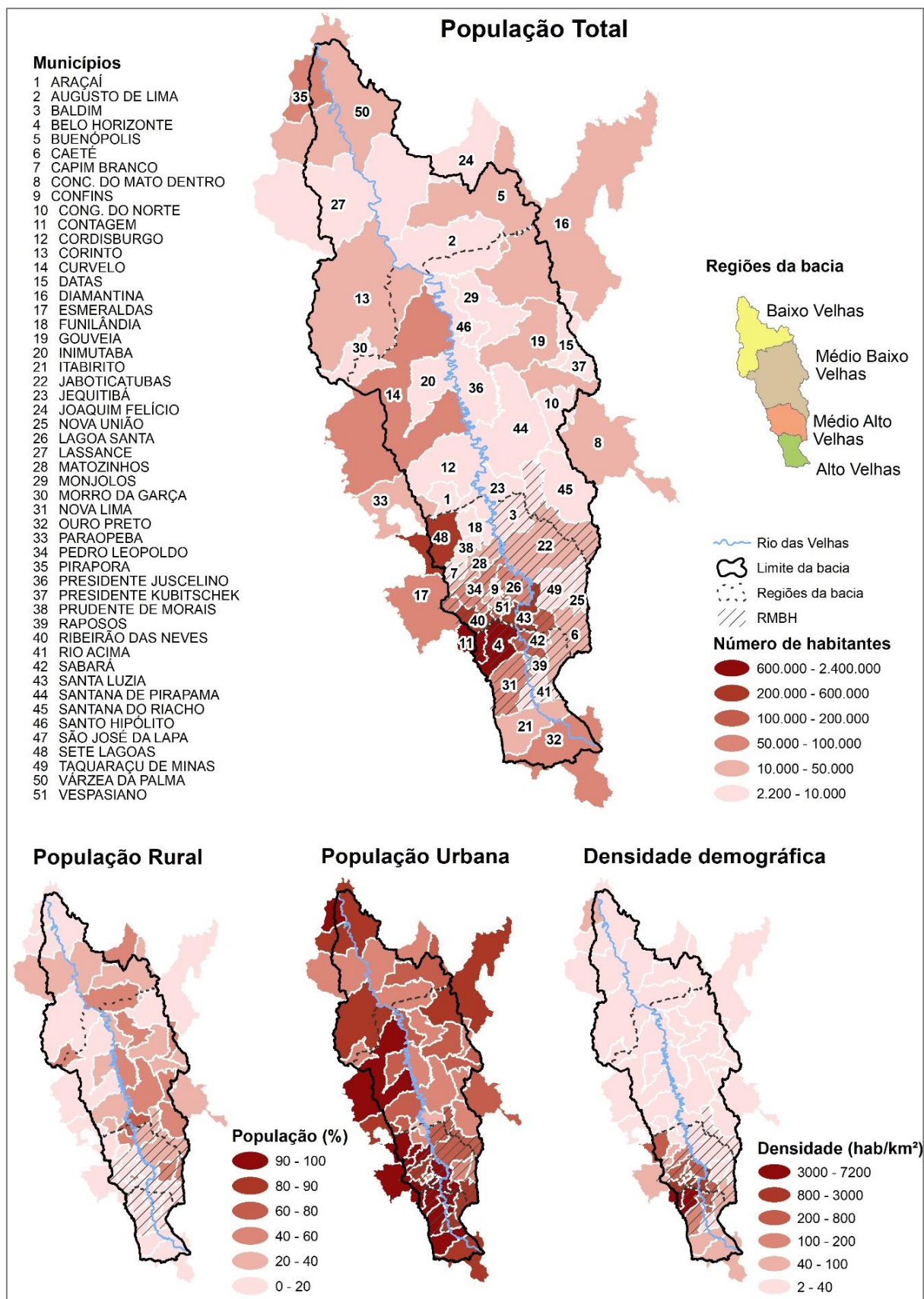


Figura 28: Distribuição da população nos municípios da bacia hidrográfica do Rio das Velhas segundo o Censo 2010 (IBGE, 2010). Elaboração: Lilian Machado, 2019.

O Médio Rio das Velhas tem como limite ao norte a foz do Rio Paraúna, o principal afluente do Rio das Velhas (COSTA, 2008). No lado esquerdo atravessa o município de Curvelo e, em outro trecho, coincide com os limites do município de Corinto. Esta região apresenta menor concentração populacional, predominando as atividades agrícolas e pecuárias. No PDRH ela foi dividida em Médio Alto e Médio Baixo Rio das Velhas em função de sua longa extensão (PDRH, 2015). Ao atravessar a RMBH, em parte do Alto e do Médio Alto Velhas, o rio recebe uma grande quantidade de efluentes domésticos e industriais, além de resíduos sólidos, resultando na baixa qualidade da água neste trecho (PDRH, 2015).

O baixo Rio das Velhas compreende, ao sul, a linha divisória entre os municípios de Curvelo, Corinto, Monjolos, Gouveia e Presidente Kubitscheck e, ao norte, os municípios de Buenópolis, Joaquim Felício, Várzea da Palma e Pirapora. Esta região é composta por oito municípios dos quais nenhum tem o território integralmente inserido na bacia. Assim como o médio Rio das Velhas, há baixa concentração populacional e o predomínio de atividades agrícolas e pecuárias (PDRH, 2015). No Baixo Velhas, além do somatório de todos os efluentes adquiridos a montante por pressão da urbanização e das atividades minerárias, também são adicionados aqueles gerados pela atividade agropecuária, que é mais abrangente nessa região (PDRH, 2015).

A bacia do Rio das Velhas é marcada pela diversidade de relevos com colinas, chapadas, escarpas, vales, dentre outras formas. O ponto mais alto da bacia, localizado no Parque Nacional da Serra do Gandarela, mede 1.727m de altitude, 1.249m mais alto que o ponto mais baixo na foz do rio principal. Considerando-se o gradiente térmico teórico, no qual a temperatura do ar eleva-se 0,65°C a cada 100m de altitude na troposfera, seria possível observar gradientes térmicos de até 8,1°C considerando-se apenas o desnível altimétrico ao longo da bacia. Segundo a classificação adaptada de IBGE (2017), a bacia é abrangida por oito unidades geomorfológicas, sendo elas a Depressão do Rio São Francisco, os Patamares do Espinhaço, de Belo Horizonte e das chapadas do Alto Rio São Francisco, as Serras do Quadrilátero Ferrífero e do Espinhaço Meridional, as Depressões Interiores do Espinhaço e as Chapadas do Alto Rio São Francisco (Figura 29).

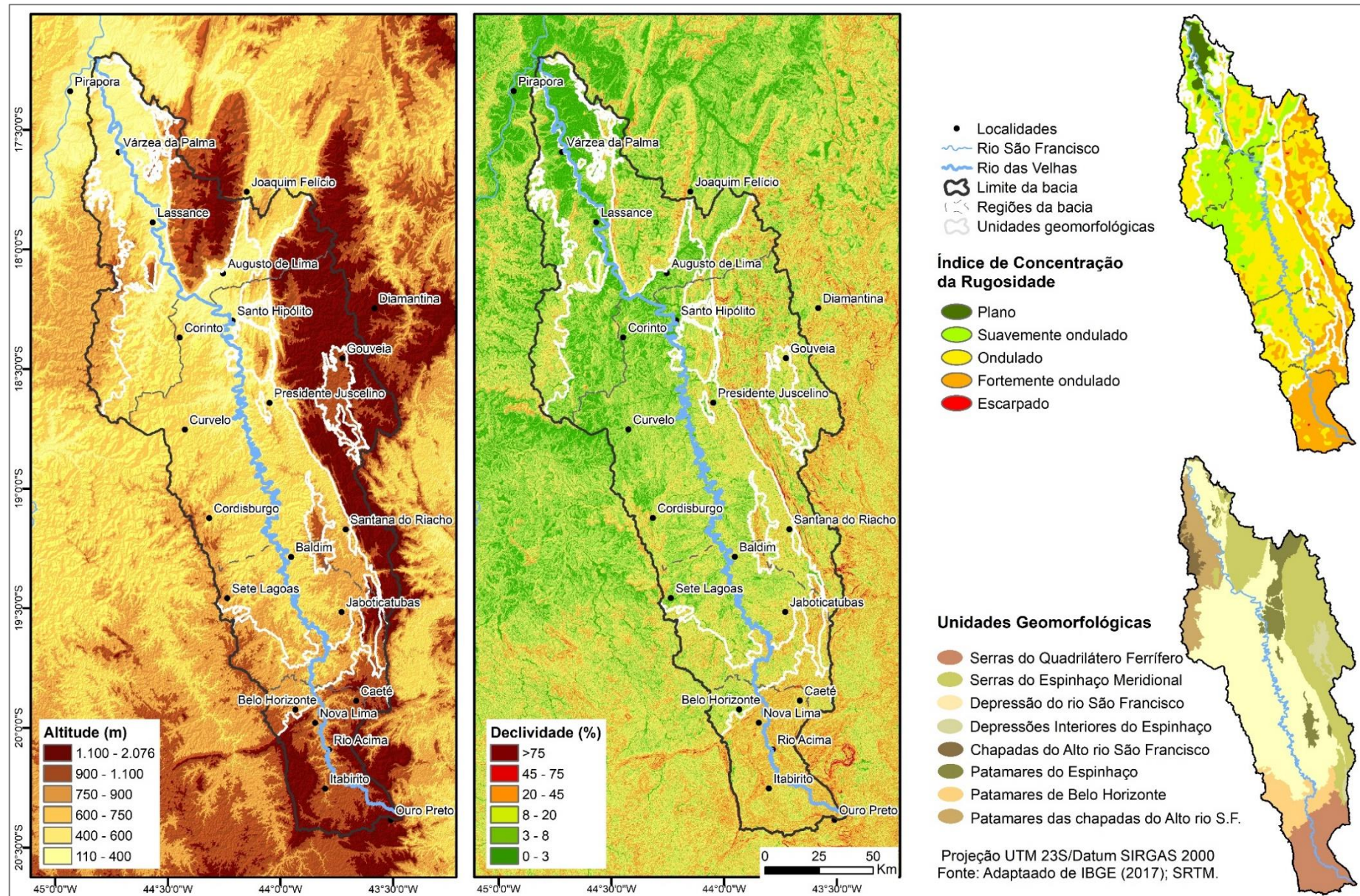


Figura 29: Características geomorfológicas da bacia hidrográfica do Rio das Velhas. Elaboração: Lilian Machado, 2019.

A Depressão do Rio São Francisco ocupa a maior extensão da bacia no Médio e Baixo Velhas e é marcada por vertentes aplainadas e dissecadas ao longo do Rio São Francisco e seus principais afluentes, acompanhando praticamente todo o curso do Rio das Velhas após o Quadrilátero Ferrífero (Figura 30a e b). A altitude média é de 665m, variando de 800 a 900m próximo a Belo Horizonte, e de 600 a 480m próximo a foz do rio (PDRH, 2015). A superfície é ondulada até próximo a Curvelo, onde passa a ser suavemente ondulada, tornando-se plana nas áreas mais próximas a foz onde estão os municípios de Lassance e de Várzea da Palma.

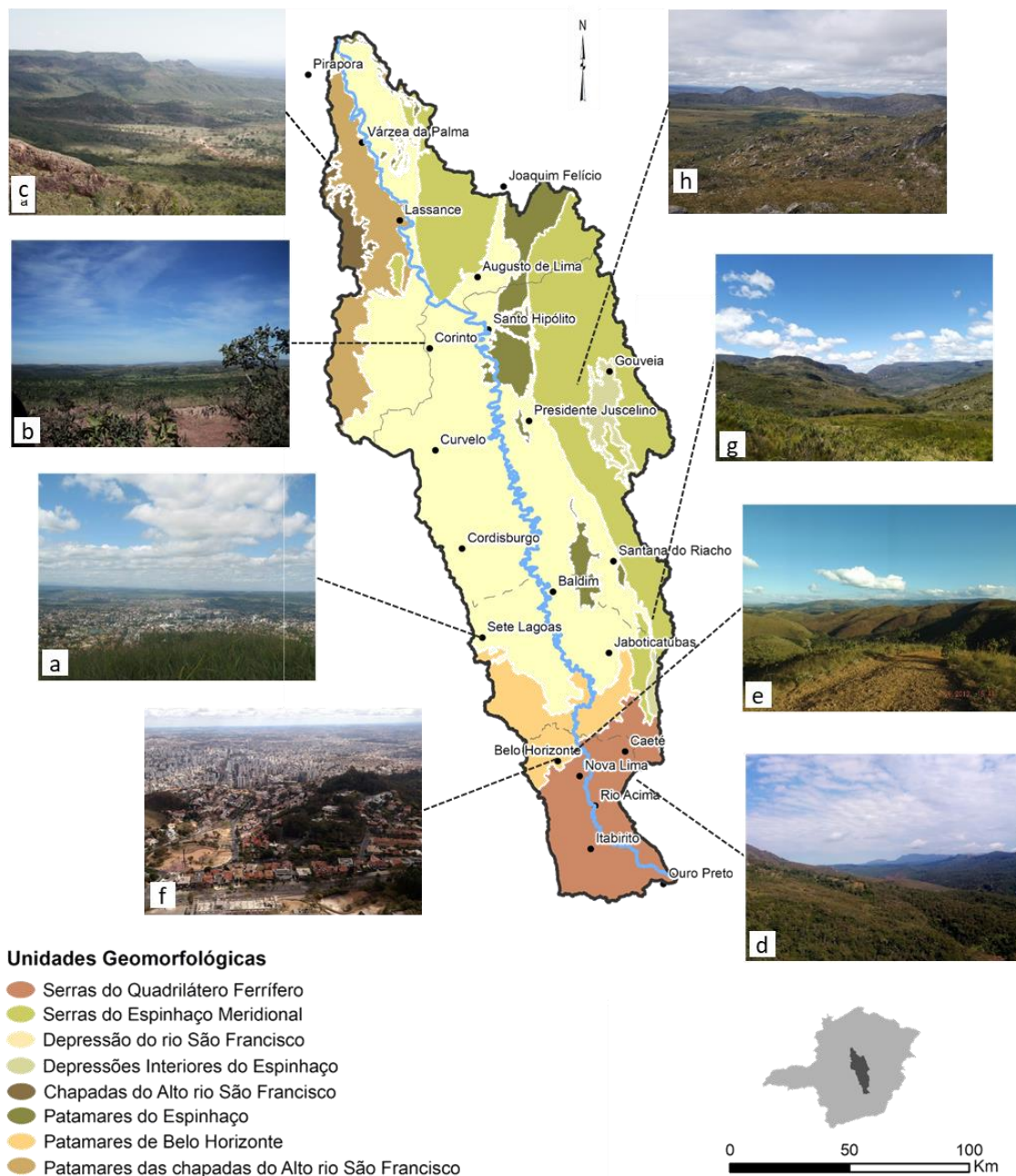


Figura 30: Paisagens da bacia do Rio das Velhas. Elaboração: Lilian Machado, 2019.

Na Depressão do Rio São Francisco a cobertura da superfície é predominantemente composta de pastagens⁶ e savanas⁷ favorecidas pela baixa rugosidade superficial dessa região (Tabela 13 e Figura 31). As áreas de florestas⁸ ocupam 11% da unidade e estão distribuídas de forma descontínua no espaço, alternadas com áreas agrícolas e pastoris. Extensas áreas de silvicultura⁹ ocupam a unidade, principalmente na região do Médio Velhas, representando 5% da Depressão. Esta é a região mais antropizada da bacia, com 72% da cobertura convertida em usos antrópicos (Tabela 14).

As Chapadas do Alto Rio São Francisco e seus patamares apresentam relevos individualizados pela drenagem do Rio das Velhas circundados pela Depressão do Rio São Francisco (PDRH, 2015). As chapadas são caracterizadas por superfícies tabulares com topos suavemente ondulados e altitude média de 815m (Figura 29). Os patamares das chapadas constituem-se em vertentes onduladas formadas por extensas rampas de colúvio com formações onduladas, distribuídas em uma altitude média de 670m, podendo atingir altimetrias próximas aos 1.000m (Figura 30c). Nas unidades predomina a cobertura natural de savana. As formações florestais e campestres¹⁰ ocupam entre 7 e 10% dessas unidades. Nos patamares as pastagens compreendem mais de 50% da região, atividade favorecida pela superfície ondulada. Já nas chapadas do Alto Rio São Francisco, a silvicultura predomina como a principal cobertura antrópica, com 143km² de florestas comerciais plantadas, 33% da unidade (Tabela 13). Ambas as unidades do relevo possuem aproximadamente 60% de suas extensões antropizadas.

As Serras do Quadrilátero Ferrífero ocupam todo o Alto Rio das Velhas. A altitude média nesta unidade é de 1.071m. O relevo é marcado por cristas, com vales encaixados, vertentes intensamente ravinadas e colinas onduladas (PDRH, 2015). O Quadrilátero é uma unidade com altitudes elevadas e declividades acentuadas, com superfície fortemente ondulada a escarpada, o que favorece a turbulência do ar e a precipitação orográfica na região (Figura 30d; e).

⁶ Áreas de pastagens, naturais ou plantadas, vinculadas a atividade agropecuária (MapBiomias, 2019).

⁷ Savana: tipo de vegetação composta por árvores de pequeno porte e estrato arbustivo-herbáceo (MapBiomias, 2019).

⁸ Floresta: tipo de vegetação composta por árvores altas com predomínio de dossel contínuo podendo ser ombrófila, decidual, semi-decidual ou estacional. (MapBiomias, 2019).

⁹ Espécies arbóreas plantadas para fins comerciais (ex. eucalipto, pinus, araucária) (MapBiomias, 2019).

¹⁰ Formações campestres com predominância de estrato herbáceo-arbustivo, herbáceo-arbóreo e herbáceo-lenhoso (MapBiomias, 2019).

Tabela 13: Cobertura da terra por compartimento de relevo na bacia do Rio das Velhas

#	o		o		) k o		) @		# k o		h		h "		h # k	
	j 7	U	7	U	7	U	7	U	7	U	7	U	7	U	7	U
	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
Floresta	1274	46%	394	6%	1375	11%	74	13%	28	7%	300	19%	390	25%	197	10%
Savana	88	3%	2532	39%	1710	14%	134	24%	133	31%	177	11%	131	8%	450	22%
Vegetação campestre	5	0%	2273	35%	293	2%	33	6%	32	7%	24	1%	3	0%	205	10%
Silvicultura	81	3%	280	4%	650	5%	10	2%	143	33%	6	0%	12	1%	105	5%
Agricultura	633	23%	34	1%	78	1%	0	0%	0	0%	8	0%	0	0%	17	1%
Pastagem	261	10%	745	11%	7944	65%	301	53%	92	21%	1101	68%	586	37%	1052	51%
Agricultura ou pastagem	3	0%	3	0%	0	0%	7	1%	0	0%	0	0%	15	1%	0	0%
Infraestrutura urbana	111	4%	1	0%	171	1%	2	0%	0	0%	0	0%	444	28%	8	0%
Áreas não vegetadas	15	1%	229	3%	19	0%	4	1%	1	0%	3	0%	1	0%	13	1%
Afloramento rochoso	218	8%	62	1%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
Mineração	44	2%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
Corpos d'água	11	0%	8	0%	54	0%	1	0%	0	0%	1	0%	5	0%	0	0%

Fonte: MapBiomias (2019). Elaboração: Lilian Machado, 2019.

Tabela 14: Cobertura da terra agrupada por tipo de uso e por compartimento de relevo na bacia do Rio das Velhas

#	o		o		) k o		) @		# k o		h		h "		h # k	
	j 7	U	7	U	7	U	7	U	7	U	7	U	7	U	7	U
	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
Área antropizada	1134	41%	1063	16%	8842	72%	321	57%	235	55%	1115	69%	1058	67%	1181	58%
Vegetação Nativa	1378	50%	5208	79%	3431	28%	242	43%	193	45%	502	31%	529	33%	852	42%
Áreas não vegetadas	233	8%	291	4%	19	0%	4	1%	1	0%	3	0%	1	0%	13	1%
Corpos d'água	11	0%	8	0%	54	0%	1	0%	0	0%	1	0%	5	0%	0	0%

Fonte: MapBiomias (2019). Elaboração: Lilian Machado, 2019.

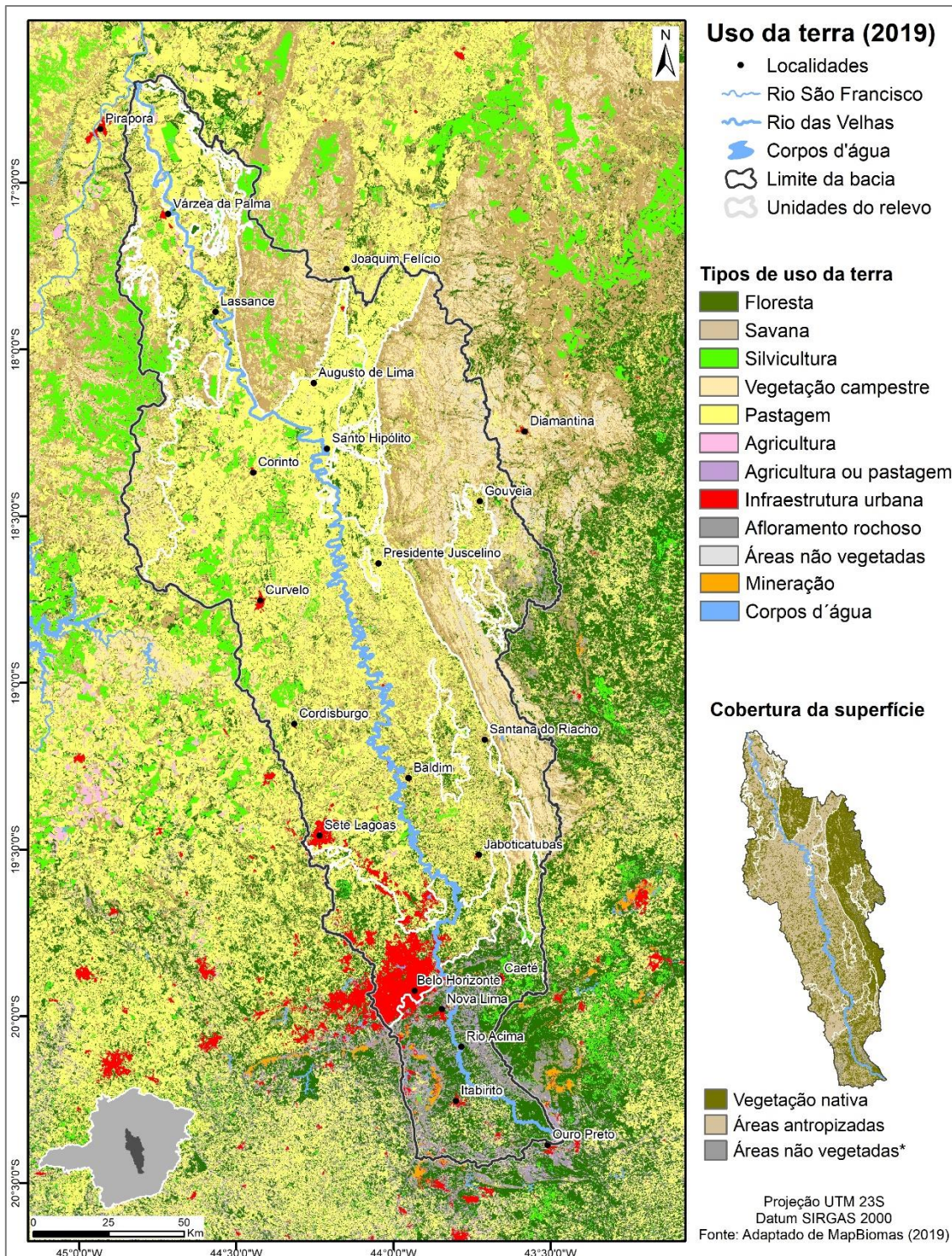


Figura 31: Uso da terra na bacia hidrográfica do Rio das Velhas. Elaboração: Lilian Machado, 2019.

No Quadrilátero a presença de áreas não vegetadas, marcadas por afloramentos rochosos e áreas de mineração a céu aberto, é expressiva e ocupa 8% da unidade. A presença de florestas densas, no entanto, é predominante na região, sendo 46% de sua extensão composta por espécies vegetais da Mata Atlântica. As pastagens, naturais ou

plantadas, e a agricultura ocupam 33% do território, embora essas não sejam as principais atividades econômicas de maior importância para os municípios do Quadrilátero.

O Quadrilátero Ferrífero tem como limite ao norte os Patamares de Belo Horizonte. Esta unidade consiste em uma transição entre as serras elevadas do Quadrilátero e as áreas rebaixadas da Depressão do Rio São Francisco (Figura 30f). A altitude média é de 830m e a superfície é caracterizada por vertentes suaves e alongadas, à medida em que se aproxima da depressão do São Francisco, e vertentes mais íngremes nas áreas próximas às escarpas e serras que se encontram no limite do Quadrilátero. A maior parte da mancha urbana metropolitana encontra-se nessa unidade, ocupando 28% da área total da unidade (Tabela 13).

As Serras do Espinhaço Meridional são os limites orientais da bacia hidrográfica do Rio das Velhas constituindo-se em um conjunto de serras e escarpas, com alinhamentos de cristas e picos intercalados com chapadas e áreas dissecadas (Figura 30g e h) (PDRH, 2015). A altitude média é de 1.113m, variando de 523 a 1.688m, com superfície fortemente ondulada a escarpada. Esta, assim como o Quadrilátero Ferrífero, é uma região onde a altitude do conjunto geomorfológico favorece a precipitação por mecanismos de turbulência e temperaturas mais amenas. A paisagem na Serra do Espinhaço é marcada por vegetação campestre e savânica composta por formações de cerrado aberto e campos rupestres entre os afloramentos rochosos quartzíticos.

As variações altimétricas intercaladas a afloramentos rochosos e solos rasos não favorecem o avanço da agropecuária, tornando esta a área que conserva o maior percentual de vegetação nativa na bacia (79%). Nesta região, a presença de unidades de conservação de proteção integral como o Parque Nacional da Serra do Cipó e o Parque Nacional das Sempre Vivas, é um fator importante para a preservação de espécies da flora e fauna, bem como a conservação da qualidade da água (Figura 32). É nessa região que nascem importantes cursos d'água afluentes do Velhas, como o Rio Cipó e o Paraúna que aportam água de qualidade ao rio principal, diluindo os efluentes dispensados na RMBH e contribuindo para a melhoria da qualidade da água do rio até sua foz.

Os limites entre a Serra do Espinhaço e as demais unidades geomorfológicas da bacia são abruptos ao logo da maior parte de sua extensão, com desníveis topográficos que superam 150m em média, marcados por escarpas de linha de falha na direção noroeste-sudeste (PDRH, 2015). Próximo à Santo Hipólito e Baldim, no entanto, formam-se Patamares da Serra do Espinhaço que se constituem em relevos individualizados pela

disseção fluvial, nos quais a altitude média é de 710m, chegando ao máximo de 1.094m. Neles, o percentual da vegetação nativa preservada é mais baixo do que nas Serras do Espinhaço, representando 31% de sua extensão (Tabela 14).

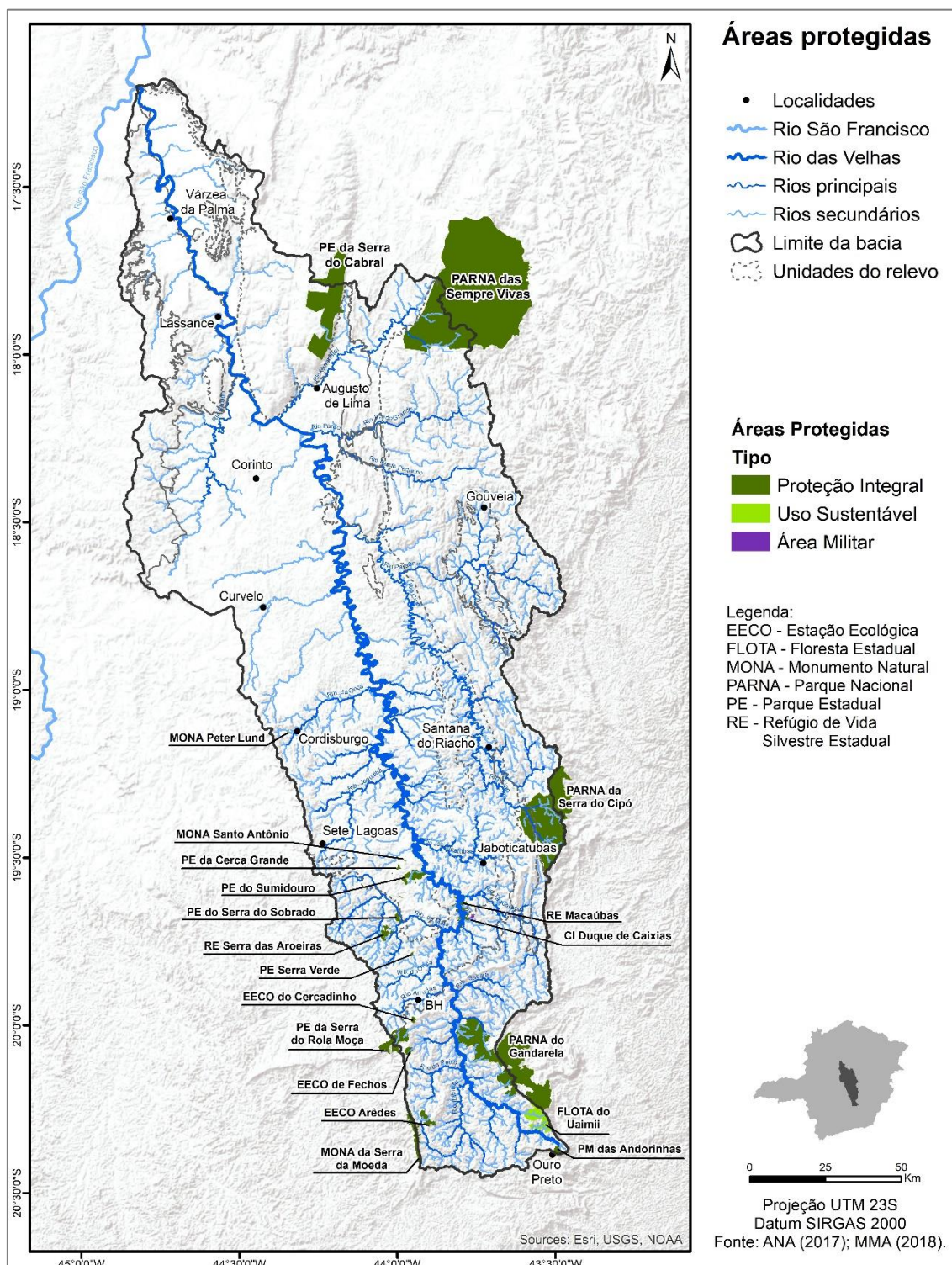


Figura 32: Drenagens principais e unidades de conservação na bacia hidrográfica do Rio das Velhas. Elaboração: Lilian Machado, 2019.

No interior do Espinhaço há uma extensa área de rebaixamento estrutural denominada Depressões Interiores do Espinhaço. Essa região também pode ser identificada como Depressão de Gouveia, em referência ao município de Gouveia, localizado em seu interior. Destaca-se na paisagem desse compartimento, vertentes convexas alongadas e grande quantidade de formas erosivas, principalmente voçorocas, além de trechos aplainados com relevos residuais que se elevam até cerca de 1.400m de altitude (SALGADO e VALADÃO, 2005). A altitude média nesta unidade é de 1.030m. Esta área mais rebaixa no interior do Espinhaço pode favorecer temperaturas médias mais elevadas do que nas serras nos arredores. Nesta unidade a cobertura de vegetação nativa corresponde a 43% de sua extensão, sendo que o relevo aplainado favorece a cobertura de pastagens e as atividades pecuárias que ocupa 54% dessa região (Tabela 14).

De modo geral, cerca de 54% da área da bacia está convertida em usos antrópicos, principalmente terras agrícolas, pastagens e silvicultura, sobretudo no Médio e Baixo Velhas, nas áreas que compõem a Depressão do Rio São Francisco, os topos aplainados das Chapadas do Alto Rio São Francisco e seus patamares (Tabela 15). A vegetação campestre natural predomina nas regiões elevadas da Serra do Espinhaço, compreendendo 10% do total da bacia. A savana ocupa 19% da bacia, distribuídas, em sua maior parte, pelo Médio e Baixo Velhas nas áreas da depressão Sanfranciscana. Já as florestas ocupam 14% da bacia, concentrando-se na região do Alto Velhas no Quadrilátero Ferrífero.

Tabela 15: Tipos de uso da terra na bacia hidrográfica do Rio das Velhas

#	M	h	#
Floresta	4033	14%	Vegetação nativa 43%
Savana	5355	19%	
Vegetação Campestre	2867	10%	
Floresta Plantada	1287	5%	Áreas antropizadas 54%
Agricultura	770	3%	
Pastagem	12083	43%	
Agricultura ou pastagem	28	0%	
Infraestrutura urbana	736	3%	
Mineração	44	0%	
Áreas não vegetadas	285	1%	Áreas não vegetadas 3%
Afloramento Rochoso	280	1%	Afloramento Rochoso 1%
Corpos d'água	80	0,3%	Corpos d'água 0,3%

Fonte: MapBiomias (2019). Organização: Lilian Machado, 2020.

As áreas urbanas, no total, ocupam uma extensão ínfima da bacia, cerca de 3%. No entanto, a concentração na região metropolitana gera modificações substanciais da superfície nessa área, que resultam em impactos no clima. Assis (2010) identificou a configuração de um clima urbano de proporções mesoclimáticas em Belo Horizonte, assim como diversos estudos identificaram padrões da temperatura do ar associados à urbanização na RMBH (SILVA e JARDIM, 2017; JARDIM, 2016; MOURA *et al.* 2013).

A bacia hidrográfica do Rio das Velhas está inserida em um contexto climático marcado pelo caráter transicional entre sistemas atmosféricos tipicamente tropicais, com regime sazonal da precipitação e temperaturas, e sistemas subtropicais, permanentemente úmidos. Sua extensão latitudinal, entre 17°15'S e 20°25'S, favorece a ampla exposição à radiação solar, bem como gera diferenças, ao longo do ano, na intensidade da insolação nos extremos da bacia (Figura 33). O ângulo de incidência da radiação na superfície é um fator determinante da quantidade de energia disponível no ambiente para as trocas termodinâmicas da atmosfera. No entanto, o direcionamento das vertentes¹¹ e a altitude também influenciam na distribuição da radiação na superfície, compensando, em determinados locais, o ganho de energia em função da latitude. É o caso das áreas do Alto Velhas, onde a elevada declividade do terreno, com amplos vales voltados para sul, e a altitude da região, amenizam os ganhos de temperatura em relação ao Baixo Velhas que, embora receba intensidade de radiação menor no solstício de verão, apresenta médias de temperaturas mais elevadas (Figura 33). O mesmo ocorre com outras áreas da bacia, como a região do Espinhaço e os Planaltos do São Francisco.

Nimer (1979) propôs uma classificação climática para o Brasil baseada em três sistemas que compõem uma chave de classificação baseada em controles genéticos e estáticos do clima. O primeiro sistema deriva da climatologia dinâmica sendo baseado em padrões de circulação atmosférica e seu fator genético-dinâmico mais abrangente, controlador do regime climático anual, definindo os climas zonais do Brasil. Nesse contexto, a bacia está inserida no clima zonal Tropical Brasil Central (Figura 34). Esse compreende as áreas onde predomina a atuação do anticiclone subtropical e de pequenas altas continentais com duas estações bem definidas, chuvosa (verão) e seca (inverno). A temperatura, segundo Nimer (1979), é quente em toda a região abrangida por esse

¹¹ Vertentes voltadas para sul tendem a receber radiação direta no período da manhã no hemisfério sul, sendo sombreadas antes das vertentes voltadas para norte no período da tarde. Portanto, a superfície tende a absorver e irradiar menos energia.

domínio climático, havendo distinção nas áreas mais elevadas e ao sul, com verão quente em todas as áreas, exceto essas últimas onde é brando.

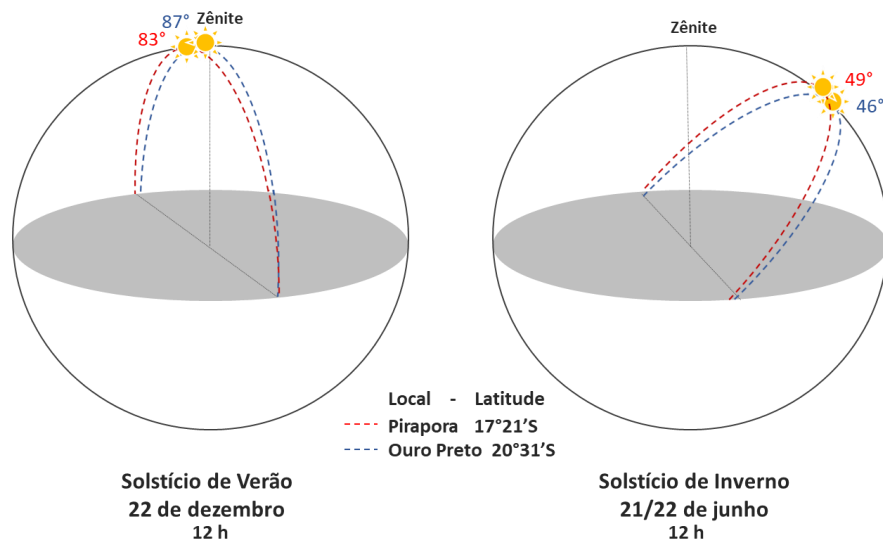


Figura 33: Ângulos de incidência da radiação solar na superfície nos solstícios de verão e inverno às 12h nos pontos de extrema latitude da bacia (Pirapora e Ouro Preto) considerando-se uma superfície plana. Elaboração: Lilian Machado, 2019.

O segundo sistema é delimitador de regiões térmicas, sendo a bacia abrangida por climas quentes, subquentes e mesotérmico (Figura 34). Os climas quentes compreendem locais onde a média térmica mensal é maior que 18°C em todos os meses do ano. É o caso de localidades como Curvelo e Pirapora onde as médias anuais de temperatura são as mais elevadas dentre os seis municípios da bacia que possuem dados da normal climatológica de 1981-2010, presentes na figura 34 (23°C e 24,2°C respectivamente) (INMET, 1981-2010). Nessas localidades as temperaturas no inverno também são mais elevadas do que nos demais municípios, caindo com maior intensidade quando há invasões de sistemas anticiclônicos provindos do sul do país. Os climas quentes compreendem as áreas de cotas abaixo de 700-900m no Médio Baixo e Baixo Velhas.

Os climas subquentes compreendem áreas onde a temperatura média está entre 15°C e 18°C em pelo menos um mês do ano, como é o caso dos municípios de Sete Lagoas e Belo Horizonte (Figura 34). A unidade compreende uma área de transição entre os climas quentes, situados nas áreas mais rebaixadas do relevo, e os climas mesotérmicos, situados nas regiões de maior. Esses últimos, possuem pelo menos um mês com temperaturas médias entre 10°C e 15°C, com verão brando no qual o mês mais quente do ano acusa média inferior a 22°C (PDRH, 2015). Trata-se de um clima cujo

predomínio de temperaturas amenas durante todo o ano são devidas principalmente ao efeito do relevo sobre o comportamento térmico e à orografia.

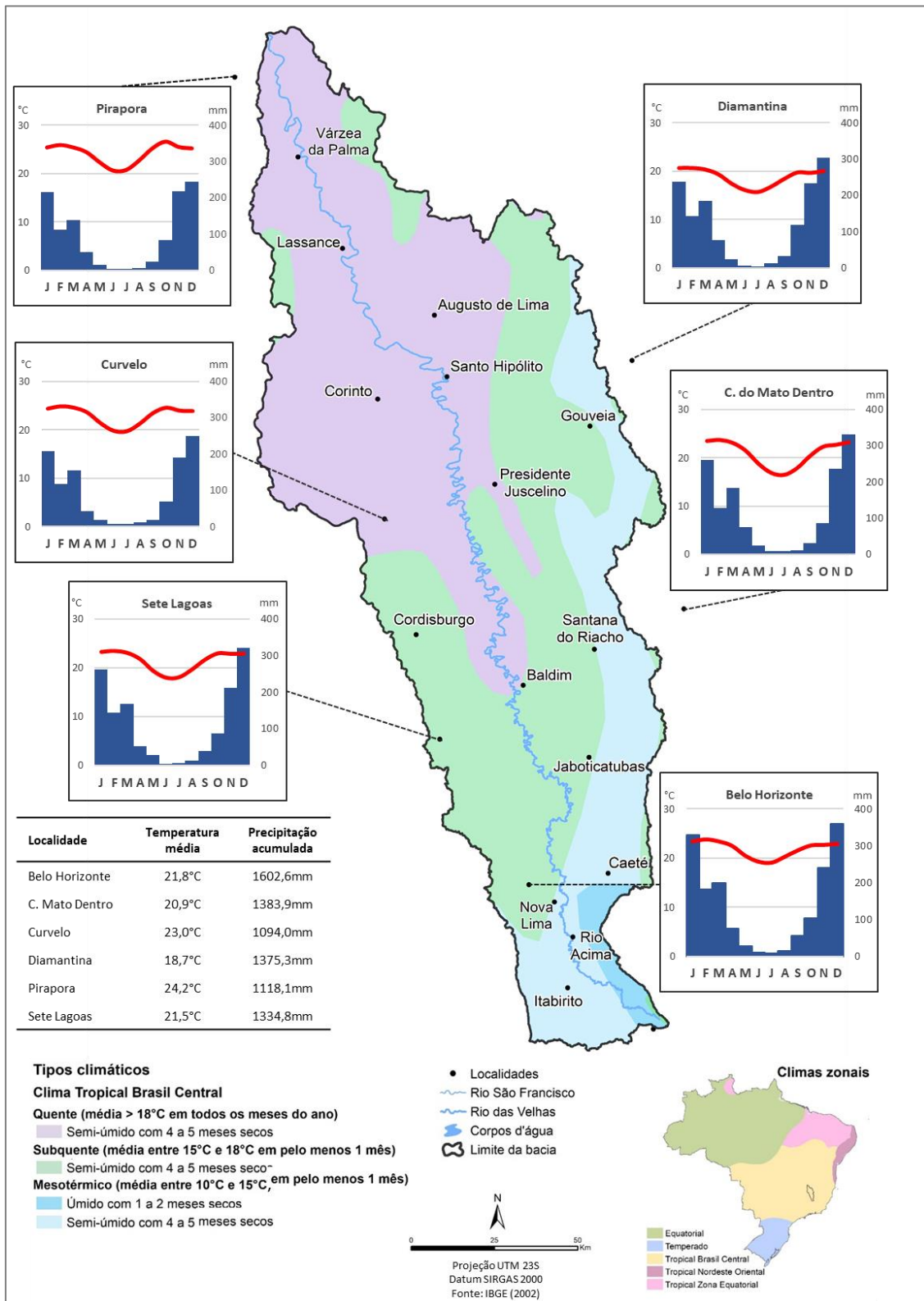


Figura 34: Tipos climáticos e climogramas (1981-2010) da bacia do Rio das Velhas. Fonte: IBGE (2002) e INMET (1981-2010). Elaboração: Lilian Machado, 2019.

O terceiro sistema é o delimitador da umidade, baseando-se na existência ou não de seca e no comprimento médio da estação seca, cuja definição é calcada no conceito de Gausson e Bagnouls (1962). Esses autores consideram mês seco aquele cuja média dos totais mensais de precipitação é igual ou inferior ao dobro da temperatura média (NIMER, 1979). A bacia é abrangida, quase em sua totalidade, por climas semiúmidos, com 4 a 5 meses secos. Segundo a classificação de Nimer (1979), somente o limite sudeste da bacia é abrangido por clima úmido, com 1 a 2 meses secos. Ainda que haja um efeito orográfico importante nessa área da bacia, é possível que os meses secos superem o índice indicado por Nimer (1979), uma vez que a atuação de sistemas atmosféricos que inibem a precipitação no inverno tem importância regional na bacia, favorecendo a configuração de meses secos no inverno.

Todas as localidades da bacia apresentam maior pluviometria entre os meses de novembro e janeiro, embora haja diferenças significativas entre os totais de cada uma delas, sendo eles mais elevados nas localidades inseridas ou próximas ao Quadrilátero Ferrífero e à Serra do Espinhaço devido ao efeito orográfico que potencializa as precipitações nessas regiões. Os meses de maior precipitação são também os que registram excedente hídrico na bacia, considerando-se a capacidade de campo do solo de 100mm (Figura 35) (INMET, s.d.). Esse excedente é maior nas áreas ao sul da bacia, onde supera 200mm no mês de dezembro, e reduz em direção à foz do rio, chegando a 100mm em Pirapora.

Os totais pluviométricos elevados e o excedente hídrico nos meses de verão estão associados à atuação de sistemas atmosféricos de baixa pressão transitórios, sendo eles os sistemas frontais (Frentes Frias - FF; Frentes Quentes – FQ; Frentes Estacionárias - FE), as Linhas de Instabilidade (LI), a Zona de Convergência de Umidade (ZCOU) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

As Frentes Frias (FF) associam-se ao avanço da massa Polar Atlântica (mPa) para as latitudes mais baixas, sendo responsáveis por parte das precipitações que ocorrem no sul da bacia durante o verão (PDRH, 2015). A passagem deste sistema durante a primavera e o verão, contribui para ocorrência de chuvas intensas, principalmente quando associado à atuação de Linhas de Instabilidade (LI). As LI constituem-se em centros semi-estacionários de baixa pressão caracterizados por uma dinâmica rápida de formação, deslocamento e dissipação, embora possam permanecer estacionárias quando em associação com a FPA (CARMO, 2013). As FF também atuam durante o inverno quando

o resfriamento do continente favorece a incursão da mPa para latitudes mais baixas. No entanto, o sistema não provoca precipitação expressiva na região da bacia nesse período do ano, já que a umidade é distribuída nas regiões ao sul e sudeste brasileiro durante sua passagem por essas regiões. Em menor frequência, as Frentes Quentes (FQ) e Estacionárias (FE), também têm participação nas precipitações na bacia assim como as FF.

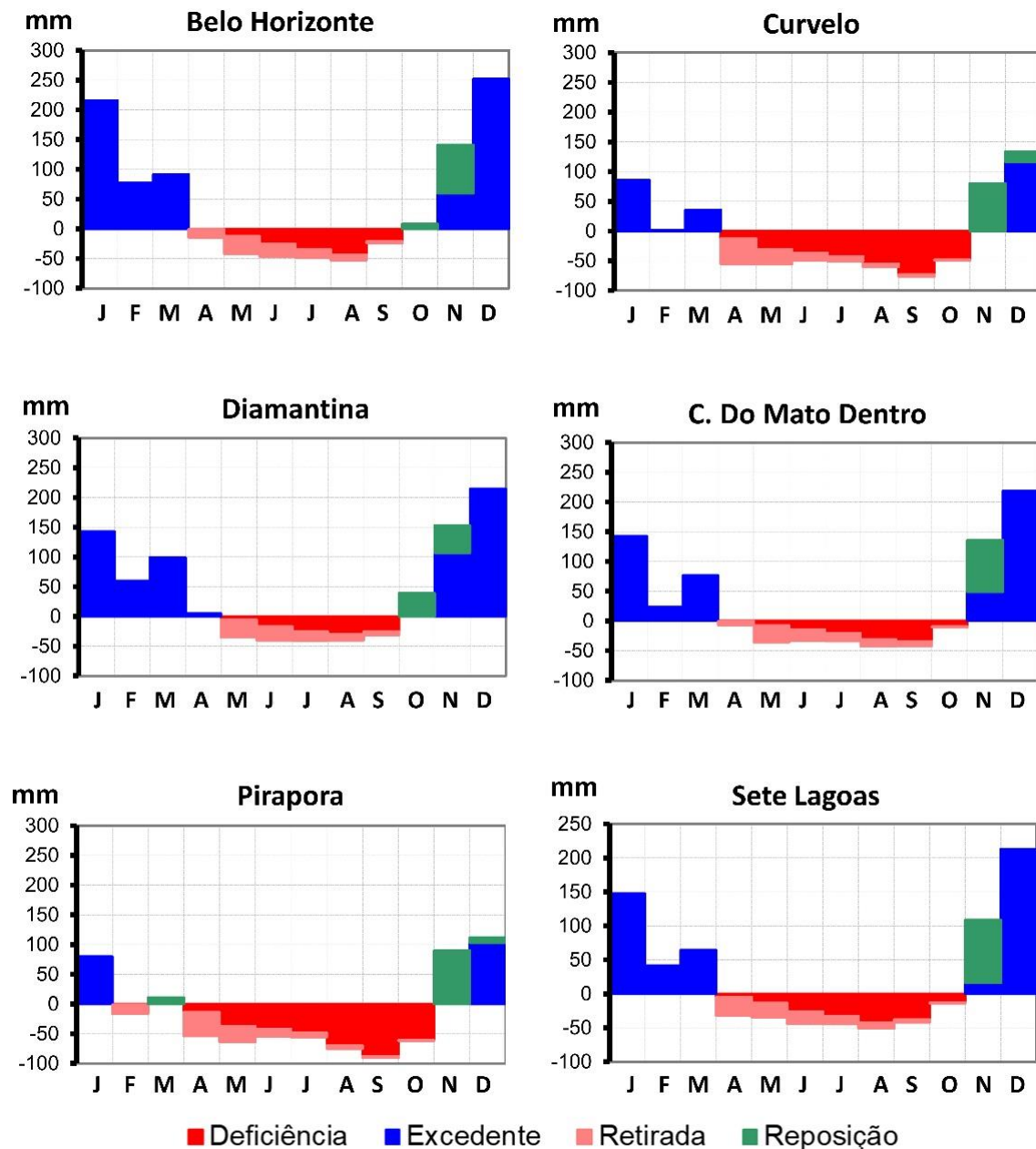


Figura 35: Balanço hídrico (1981-2010) de localidades da bacia hidrográfica do Rio das Velhas. Fonte: INMET (1981-2010). Elaboração: Lilian Machado, 2019.

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é formada pela associação entre a FPA, a convecção tropical proveniente da região amazônica, o Vórtice

Anticiclônico de Altos Níveis (VCAN) que se posiciona no Nordeste brasileiro e a Alta da Bolívia (AB). A FF atua como um canalizador da convergência do ar nos baixos níveis da atmosfera que alinha a umidade originada na região amazônica para sudeste, configurando-se uma banda de nebulosidade com orientação NW-SE que se estende desde a Amazônia até o Sudeste do Brasil, prolongando-se, com frequência, sobre o oceano Atlântico (ABREU, 1998; CAVALCANTI *et al.*, 2009). O posicionamento do VCAN e da AB complementam a dinâmica atmosfera em altos níveis que condicionam a formação da ZCAS. A atuação da ZCAS resulta na ocorrência de eventos pluviais concentrados que podem durar de 3 a 8 dias (ou mais). A formação deste sistema na região Sudeste acontece, principalmente, entre os meses de outubro e março, com maior frequência entre novembro e janeiro, sendo o principal responsável pelos altos índices pluviométricos e o excedente hídrico nesta época do ano na bacia.

A atuação da ZCAS está diretamente associada a sistemas atmosféricos de altos níveis, sendo eles a Alta da Bolívia (AB) e o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN). A Alta da Bolívia consiste em um anticiclone que ocorre na alta troposfera na região da depressão do Chaco, no verão (GUSMÃO, s.d.). Já o VCAN consiste em um centro de pressão relativamente baixa que se origina na alta troposfera, com movimentos subsidentes em seu centro e ascendentes na periferia, atuando, no Brasil, na costa da região Nordeste (FERREIRA *et al.*, 2009). A circulação divergente em altos níveis da AB se direciona à circulação convergente da ZCAS e do VCAN, tornando a atuação desses sistemas interligada.

Um outro fenômeno atmosférico de ocorrência principalmente no verão é responsável por aportar umidade na região Sudeste, tendo influência sobre a área da bacia. Os Jatos de Baixos Níveis da América do Sul (JBNAS) consistem em uma esteira de transporte de umidade da região amazônica resultante da ação dos ventos alísios (mais intensos no verão) que, soprando de nordeste para sudoeste, se deparam com a barreira orográfica dos Andes, adotando um escoamento ao longo da cadeia de montanhas até que a umidade é distribuída no centro-sul do Brasil (MARENGO *et al.*, 2009). As condições de tempo associadas a este fenômeno são, segundo Marengo *et al.* (2009) de instabilidade com a formação de grandes nuvens convectivas na região de saída do jato, que podem gerar fortes tempestades e enchentes.

Durante o verão há ainda a atuação da massa Tropical continental, que se forma na zona de baixa pressão da depressão do Chaco, na Bolívia devido ao intenso

aquecimento da superfície continental Sul-Americana nesse período do ano. Embora seja uma massa de ar de baixa pressão, sua característica continental reduz as chances de precipitação durante sua atuação devido a escassa fonte de umidade em sua origem. No entanto, a atuação da mTc pode estar associada a chuvas isoladas de caráter convectivo, conforme Assis (2010) caracteriza sua atuação sobre o município de Belo Horizonte.

Os meses de menor precipitação concentram-se no inverno, entre junho e agosto. Enquanto nos meses de verão há diferenças pluviométricas mensais que ultrapassam 100mm entre as localidades da bacia, os meses de inverno apresentam precipitação média muito semelhante entre as diferentes regiões da bacia, não ultrapassando a diferença média de 6mm. O norte da bacia é uma área crítica em relação ao déficit hídrico ao longo do ano. Pirapora apresenta oito meses de déficit, resultantes da menor intensidade da atuação de sistemas atmosféricos de precipitação contínua, como ocorre no Alto Velhas.

No inverno, o resfriamento da superfície continental potencializa a atuação de sistemas de alta pressão sobre o sul e sudeste do país. Na região da bacia do Rio das Velhas a massa Tropical atlântica (mTa) e a massa Polar atlântica são os principais sistemas que atuam nessa estação. Embora a mTa tenha influência sobre a bacia durante todo o ano, ela é o principal sistema atmosférico responsável pela estabilidade do tempo no inverno na região, resultando na baixa precipitação e na deficiência hídrica nesta época.

A mPa origina-se na zona subantártica, nas proximidades do centro-sul da Patagônia e atinge a região da bacia com frequência, sobretudo no semestre outono-inverno. Sua passagem é marcada pelo estabelecimento de tempo firme, após a passagem das frentes frias, e pela queda acentuada da temperatura do ar (CAVALCANTI *et al.*, 2009). Quando há a atuação deste sistema no verão, após a passagem da frente fria, sua característica térmica amena é reduzida em função da tropicalização do sistema ao atravessar extensas áreas com superfície aquecida pela maior disponibilidade de energia radiativa nesta estação.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta a análise dos dados meteorológicos da bacia hidrográfica do Rio das Velhas, bem como o resultado da aplicação de métodos analíticos do clima, como o cálculo do balanço hídrico meteorológico, dos anos padrão, meses secos e chuvosos. Os resultados são apresentados a partir de cada série analisada (normais de 1961-1990 e série de 1991-2019) e, ao final, é feita, uma síntese das observações sobre ambas as séries.

4.1 Normais climatológicas de 1961 a 1990

Os dados apresentados e analisados nesse tópico são referentes ao cálculo das normais climatológicas de 1961-1990 utilizando-se os dados matriciais do projeto TerraClimate e dados derivados a partir dos originais.

4.1.1 Precipitação e Velocidade dos Ventos

A distribuição da precipitação na bacia hidrográfica do Rio das Velhas é marcada pela influência orográfica e pelo posicionamento e deslocamento dos sistemas atmosféricos instáveis que se dá preferencialmente na direção sudoeste/nordeste em Minas Gerais, como as frentes frias e as linhas de instabilidade. A análise de correlação apontou a forte relação existente entre precipitação, altitude, rugosidade e latitude com as chuvas. Assim, a alta bacia e a borda leste, margeada pela Serra do Espinhaço, consistem nas áreas de maior concentração da precipitação acumulada anual, havendo uma redução brusca dos totais pluviométricos logo que esses patamares altimétricos são vencidos, conforme fica explícito nas figuras 36 a 38. Nessas áreas os totais pluviométricos podem superar os 1.600mm anuais.

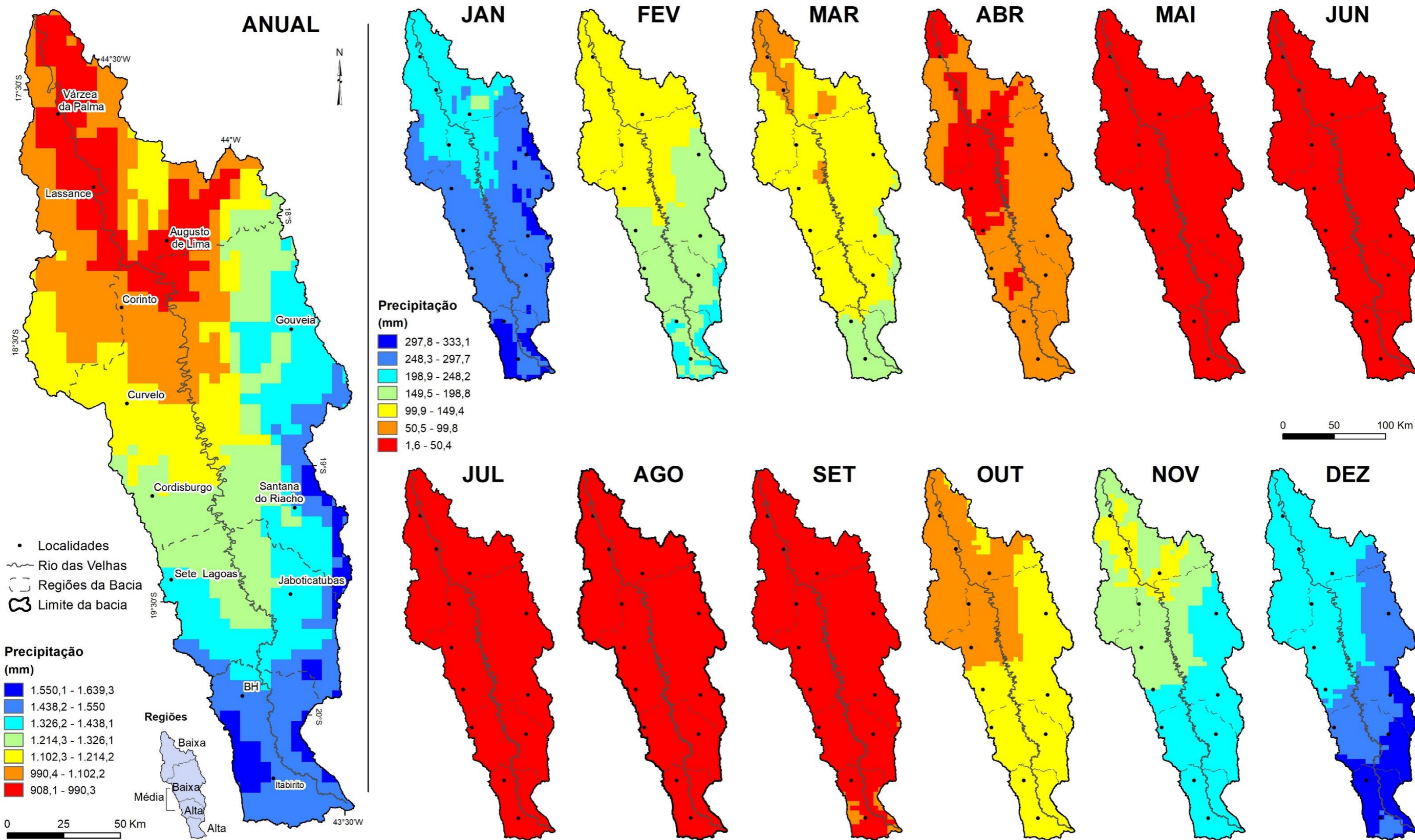


Figura 36: Precipitação acumulada média na bacia hidrográfica do Rio das Velhas de 1961 a 1990.

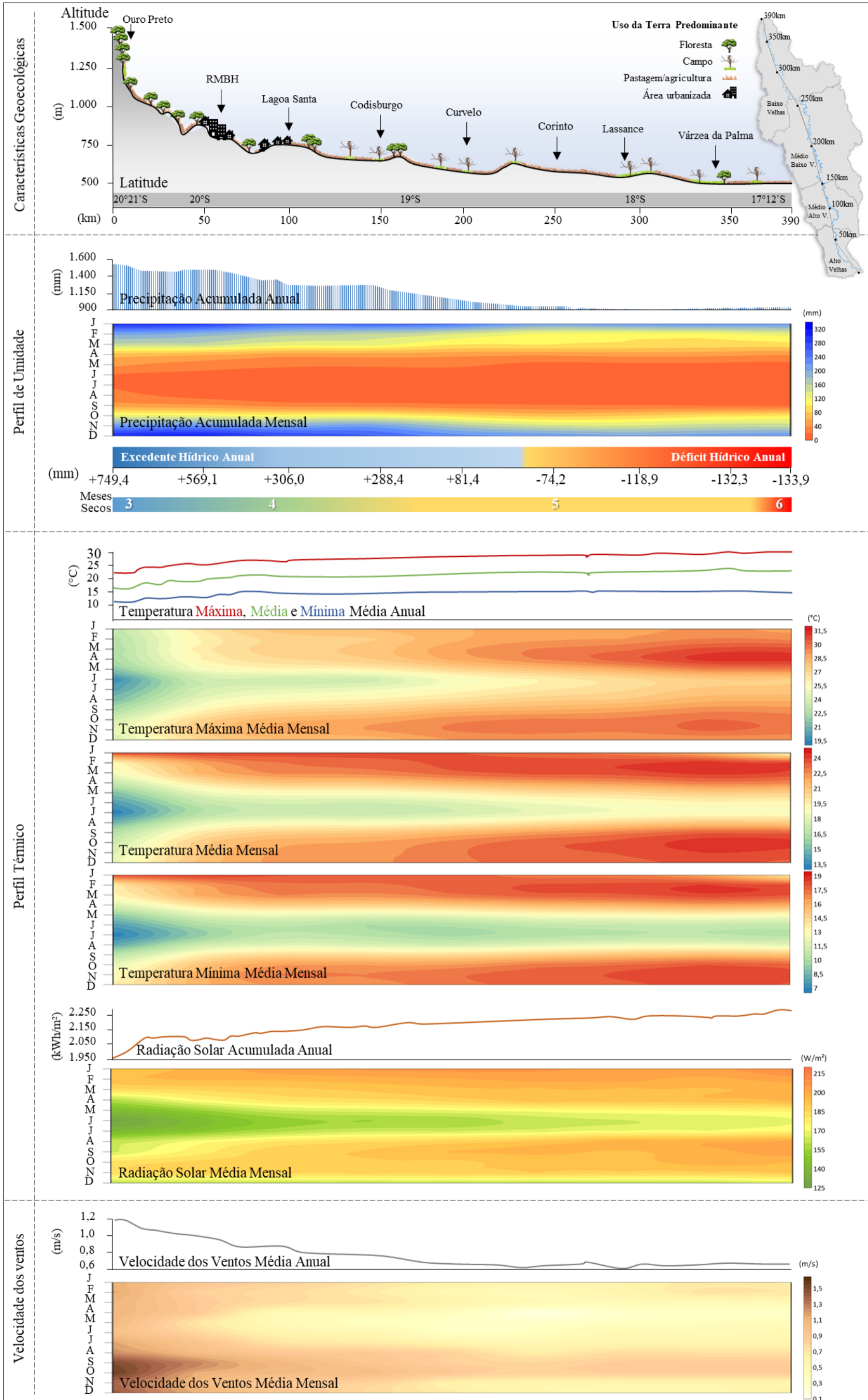


Figura 37: Perfil Geocológico I. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

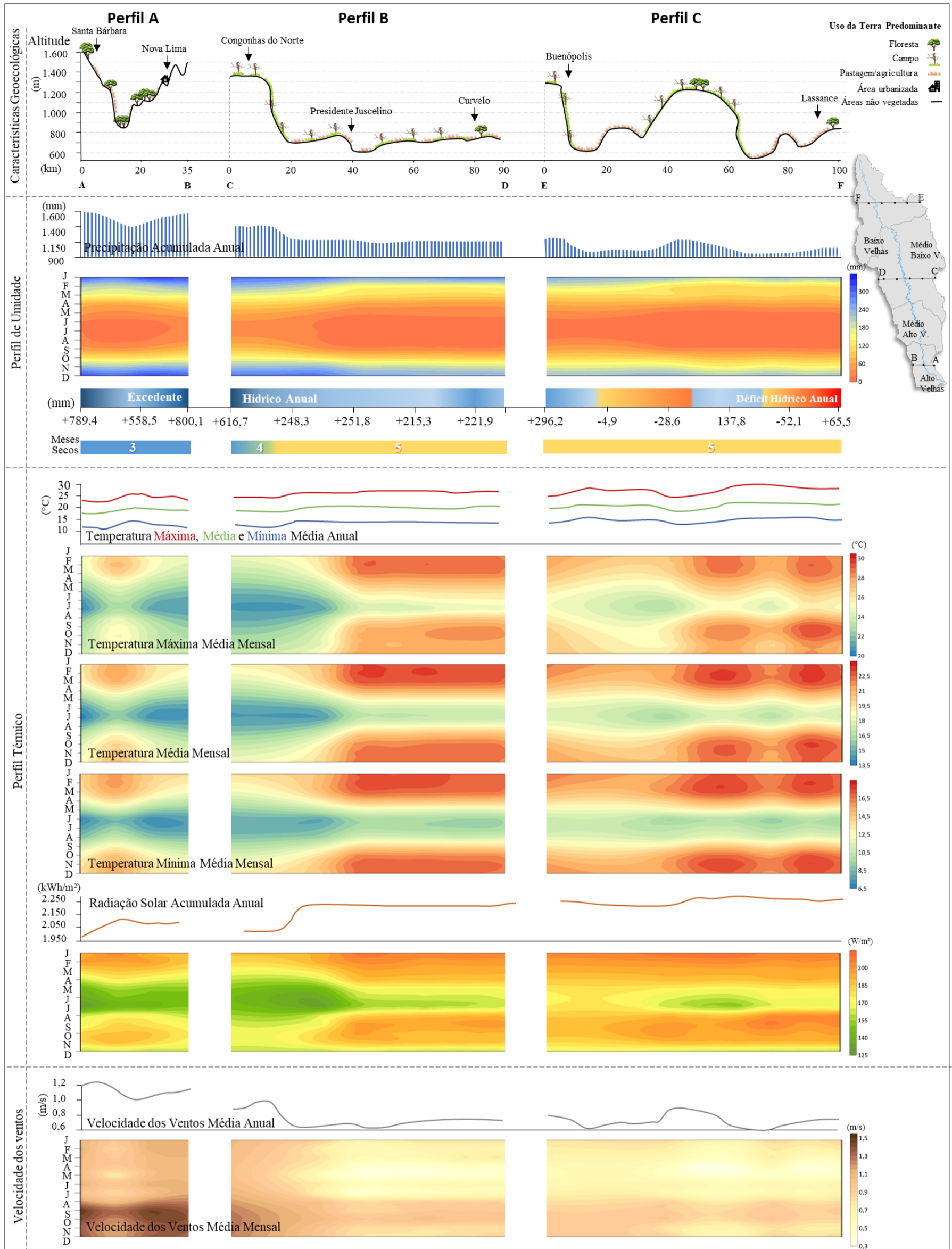


Figura 38: Perfil Geológico II. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

No baixo Velhas é marcante a redução da precipitação em relação às áreas altas da bacia. Se por um lado é esperado que superfícies rebaixadas e planas do relevo recebam menor precipitação em comparação aos locais de maior altimetria e rugosidade, no Velhas a direção de deslocamento dos sistemas instáveis não-estacionários também é um fator importante de influência sobre as chuvas. A incursão de sistemas atmosféricos de precipitação expressiva e contínua no baixo Velhas é menos frequente por uma característica de deslocamento desses sistemas (SW-NE) e pela perda de umidade dos mesmos quando esses transpassam as áreas elevadas do alto Velhas.

No entanto, a presença da Serra do Cabral no baixo Velhas, superfície elevada próximo ao município de Augusto de Lima, propicia uma alta de até 300mm nos totais anuais da precipitação em relação ao seu entorno. Esse é um efeito da altitude e rugosidade sobre os sistemas atmosféricos instáveis atuantes na região, tornando-a, inclusive, uma área onde o saldo hídrico anual é positivo, diferente de seu entorno (Figura 39).

A altitude e posicionamento do relevo também é um condicionante importante da velocidade dos ventos (Figura 40). As áreas elevadas da alta bacia e da Serra do Espinhaço apresentam maiores velocidades do vento e geram um efeito de barreira que resulta em circulação mais lenta no baixo Velhas e regiões centrais da média bacia. Nessas áreas, a velocidade média anual dos ventos varia de 0,52 m/s a 0,89 m/s, em contrapartida às áreas mais elevadas que variam entre 0,9 e 1,39 m/s.

A distribuição da precipitação anual, junto à incidência de radiação solar mais intensa ao norte da bacia que favorece a evapotranspiração, condiciona um balanço hídrico anual negativo na foz do rio e seu entorno. Esse déficit pode chegar a cerca de 150mm anuais na região da cidade de Augusto de Lima e Várzea da Palma. Já as áreas de excedente podem chegar à aproximadamente 870mm em pontos da alta bacia do Rio das Velhas, próximo à nascente do curso d'água principal, e na borda leste, ao longo da Serra do Espinhaço. Assim a bacia apresenta excedente hídrico mais elevado ao sul e sudeste da bacia, o qual reduz-se gradualmente em direção ao baixo Velhas, onde converte-se em déficit.

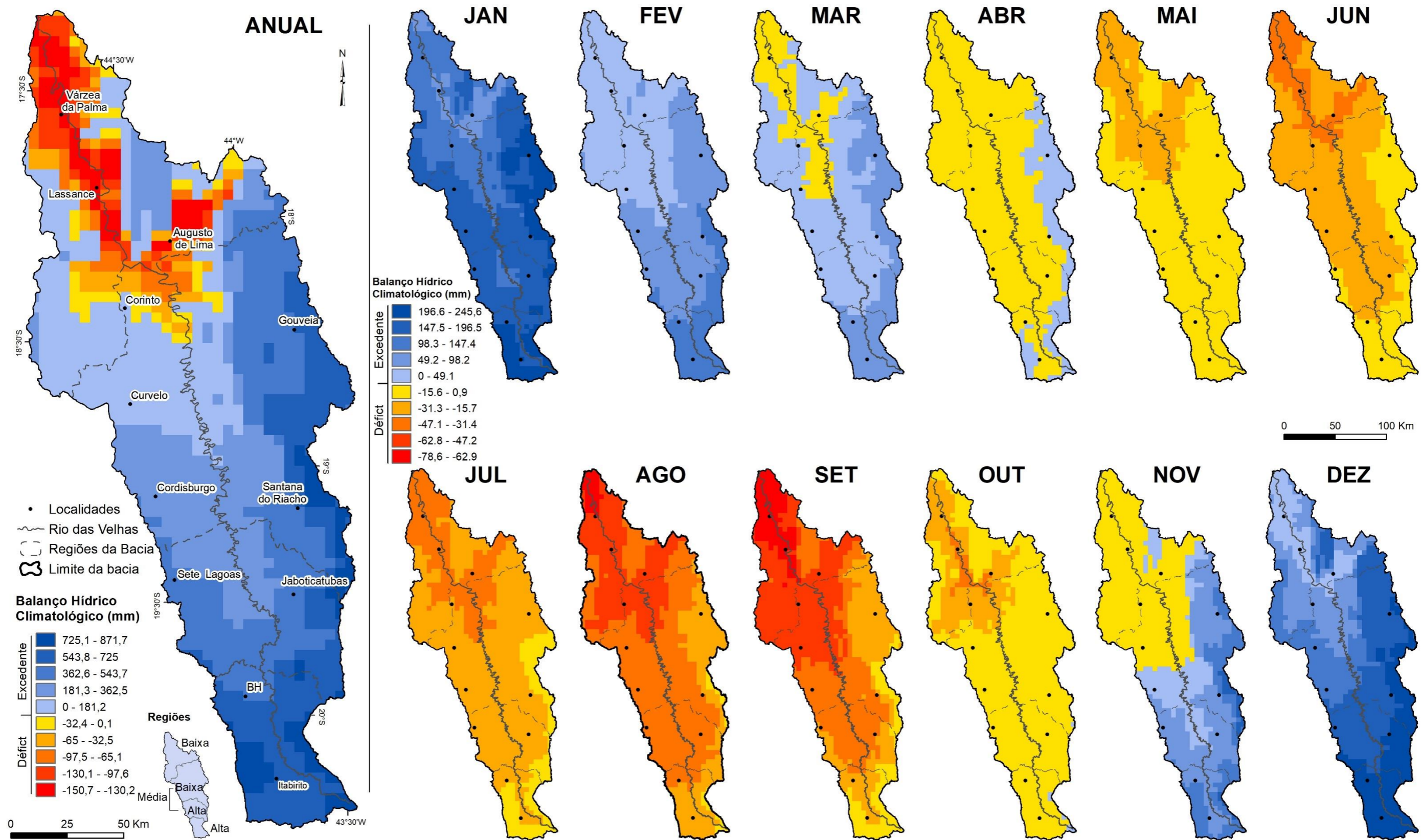


Figura 39: Balanço Hídrico Climatológico da bacia hidrográfica do Rio das Velhas no período de 1961 a 1990.

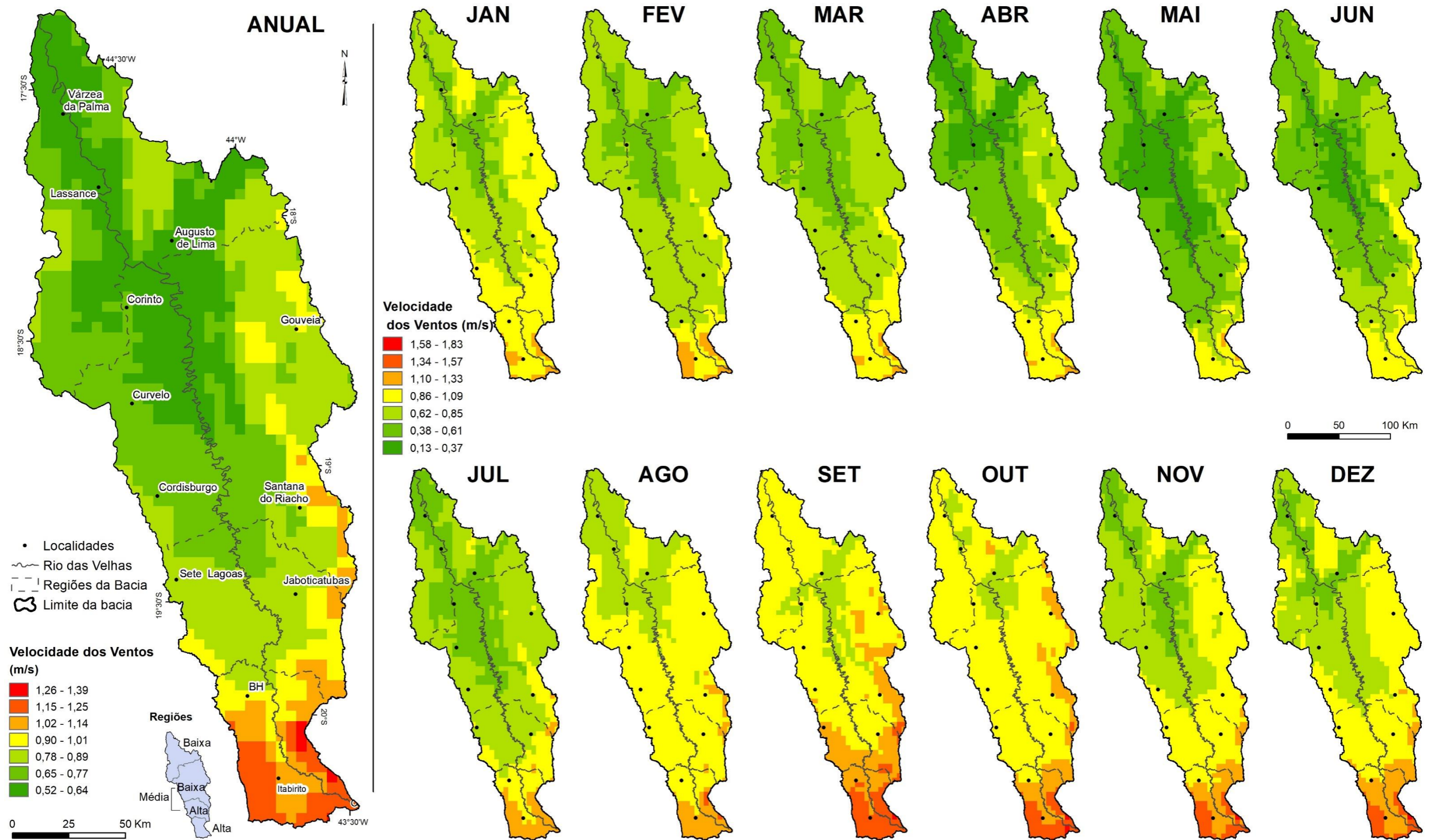


Figura 40: Velocidade média dos ventos na bacia hidrográfica do Rio das Velhas no período de 1961-1990.

Além da variabilidade espacial, a precipitação na bacia do Velhas apresenta uma variabilidade mensal expressiva, marca da sazonalidade dos climas tropicais. Esta sazonalidade fica evidente quando se observa o percentual da precipitação trimestral em relação ao acumulado anual (Figura 41). Enquanto o trimestre NDJ, o mais chuvoso, responde por até 55% da precipitação anual na região próxima à nascente do Velhas e até 61% nas demais áreas da bacia, o trimestre mais seco, JJA, responde por menos de 5% da precipitação acumulada anual.

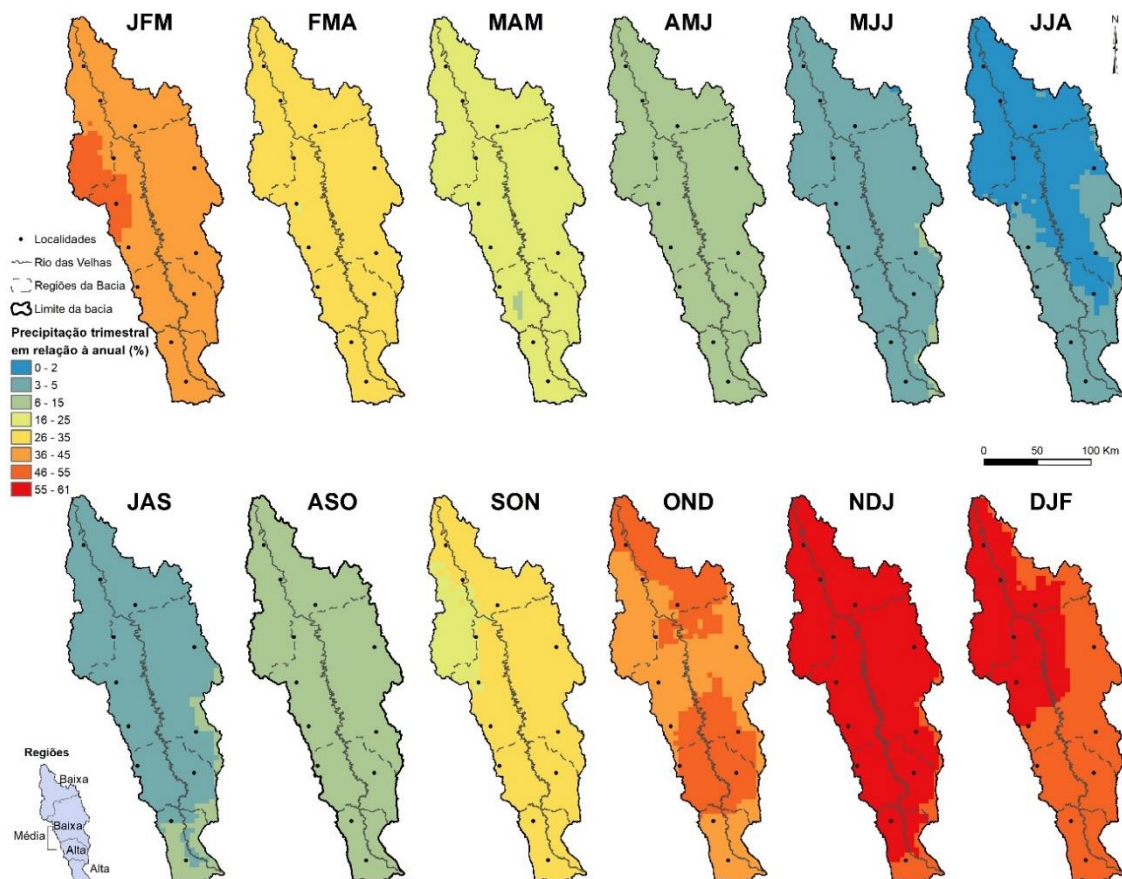


Figura 41: Percentual da precipitação trimestral em relação ao acumulado anual na bacia hidrográfica do Rio das Velhas no período de 1961-1990.

Os meses de dezembro e janeiro são os mais chuvosos em toda a bacia, variando os totais pluviométricos de 198,9 a 333,1mm. Nesses meses, os principais sistemas atmosféricos responsáveis pela precipitação acumulada é a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e a Zona de Convergência de Umidade (ZCOU), além das instabilidades que geram chuvas localizadas. Também a passagem de Linhas de Instabilidade associadas a Frentes Frias nesta época do ano gera chuvas intensas que contribuem para a distribuição da precipitação da bacia no verão. Mesmo nesses meses mantem-se o padrão de maior precipitação na alta bacia e na borda leste, como fica

evidente nas figuras 36 e 38. A pluviosidade expressiva reflete no balanço hídrico mensal positivo que se inicia em novembro, abrangendo a alta e média bacia até a região próxima a Codisburgo, e estende-se para toda a bacia em dezembro, janeiro e fevereiro (Figura 39).

Os meses mais secos consistem no trimestre junho, julho e agosto, que acumulam um máximo de 2% da precipitação anual no baixo e parte do médio Velhas, e até 5% no alto Velhas e nas bordas sudoeste e sudeste da bacia (Figura 41). Porém, de maio a setembro toda a bacia apresenta índices de precipitação acumulada abaixo de 50,4mm. Assim, configuram-se, segundo a metodologia de Gaussen-Bagnouls (1962), meses secos que se iniciam em abril na região mais próxima à foz do curso d'água principal e estende-se em maio para todo o território da bacia, com exceção do alto Velhas e da borda sudeste da Serra do Espinhaço. O período seco se mantém até setembro quando as áreas mais altas e rugosas da bacia voltam a ser chuvosas por influência da orografia, em contrapartida às áreas mais baixas (Figura 42). Essa dinâmica resulta em uma variação espacial de 3 a 6 meses secos anuais, que aumentam de forma gradual da alta bacia e borda leste em direção ao baixo velhas.

É interessante observar que nos meses chuvosos (outubro-abril) existe uma variação espacial da precipitação expressiva que pode chegar a aproximadamente 200mm de diferença entre as áreas de maior e menor precipitação. Porém, nos meses secos (maio-setembro) a variabilidade espacial da precipitação é inferior a 50mm, resultado da atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) sobre o continente, sistema que mantém o tempo estável e inibe a precipitação. O prolongamento da baixa precipitação resulta em déficit hídrico que se inicia em abril nas áreas mais baixas da bacia em comparação à alta bacia e borda leste, e prolonga-se até outubro para toda a bacia, e novembro para as regiões do baixo e parte do médio velhas. Embora outubro já seja um mês chuvoso para toda a bacia, a sequência de meses com baixa disponibilidade hídrica resulta no prolongamento do déficit hídrico, que só é sanado, em parte, no mês de novembro e, em toda a bacia, no mês de dezembro (Figura 39).

Os meses de abril, maio, setembro e outubro compreendem a transição entre o período seco, marcadamente de junho a agosto, e chuvoso, de novembro a março. Embora o mês de setembro apresente as regiões mais altas da bacia como chuvosas, ainda há déficit hídrico que pode chegar a 97,5mm, efeito dos meses prolongados de seca favorecida pela atuação predominante do ASAS sobre o continente nesta época do ano.

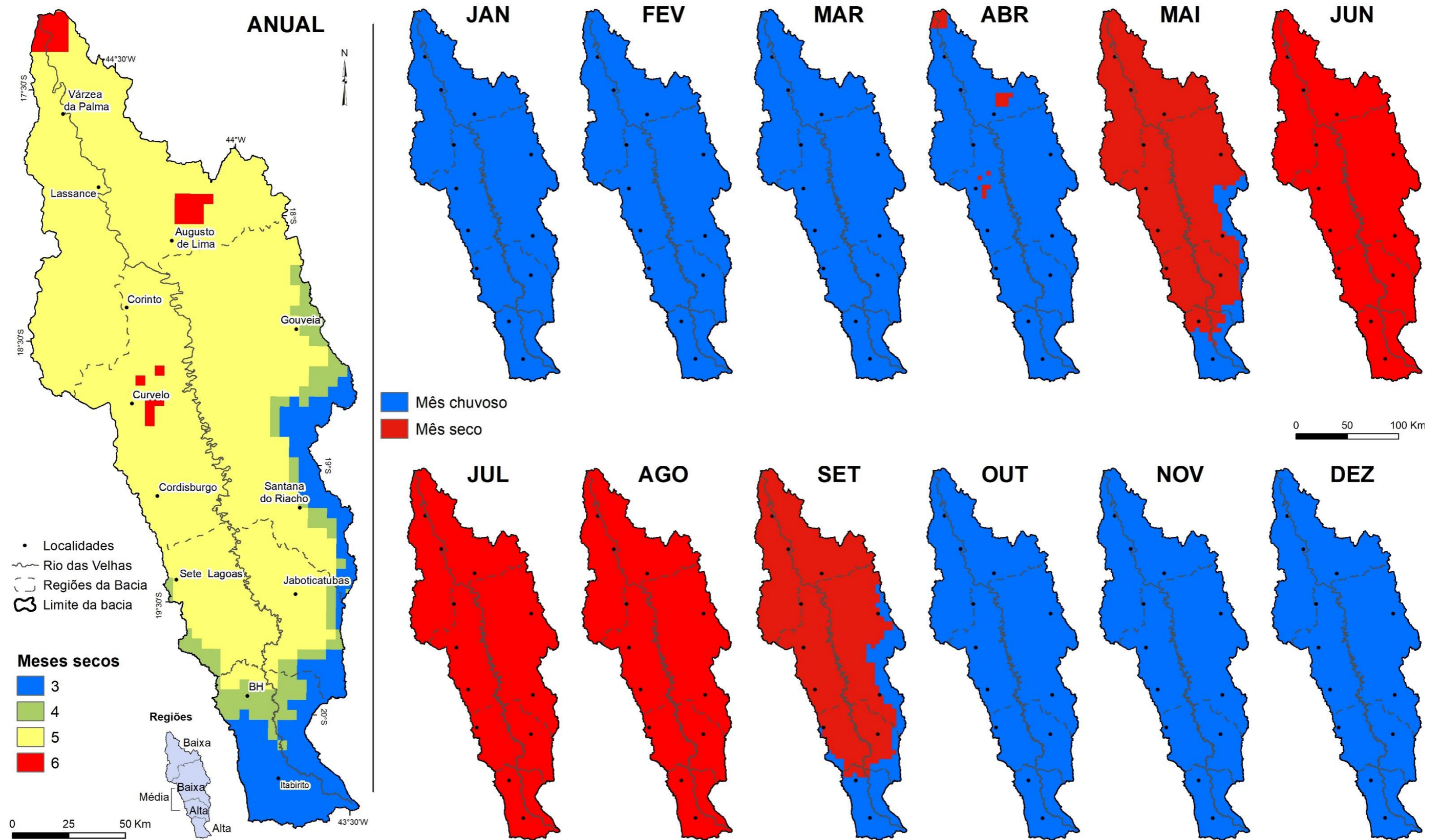


Figura 42: Meses secos na bacia hidrográfica do Rio das Velhas no período de 1961 a 1990.

Assim como a precipitação possui um perfil sazonal e uma variação espacial marcante, sua variabilidade interanual também é expressiva, corroborando com o caráter não estacionário do clima (Apêndice VIII). No período de 1961 a 1990 a bacia passou por 10 anos em que todo o território hidrográfico do Velhas apresentou ano padrão normal (1964/1967-1969/1971-1975/1982), ou seja, um terço do período de 30 anos.

Nos demais anos houve a configuração de períodos secos, chuvosos e tendentes a esses extremos, tanto cobrindo todo o território da bacia como variando espacialmente o tipo de ano padrão. Dessa forma, a região do alto Velhas foi a que apresentou o maior número de ocorrências de anos normais, variando entre 18 e 21 anos, o que representa de 60 a 70% do período de 1961 a 1990 (Figuras 43 e 44). Portanto, pode-se dizer que o alto Velhas foi a região da bacia que apresentou menor desvio da precipitação anual em relação à normal frente às demais áreas da bacia. O médio e baixo Velhas apresentaram um total de 12 a 17 anos normais que representam de 40 a 59% do total de anos analisados.

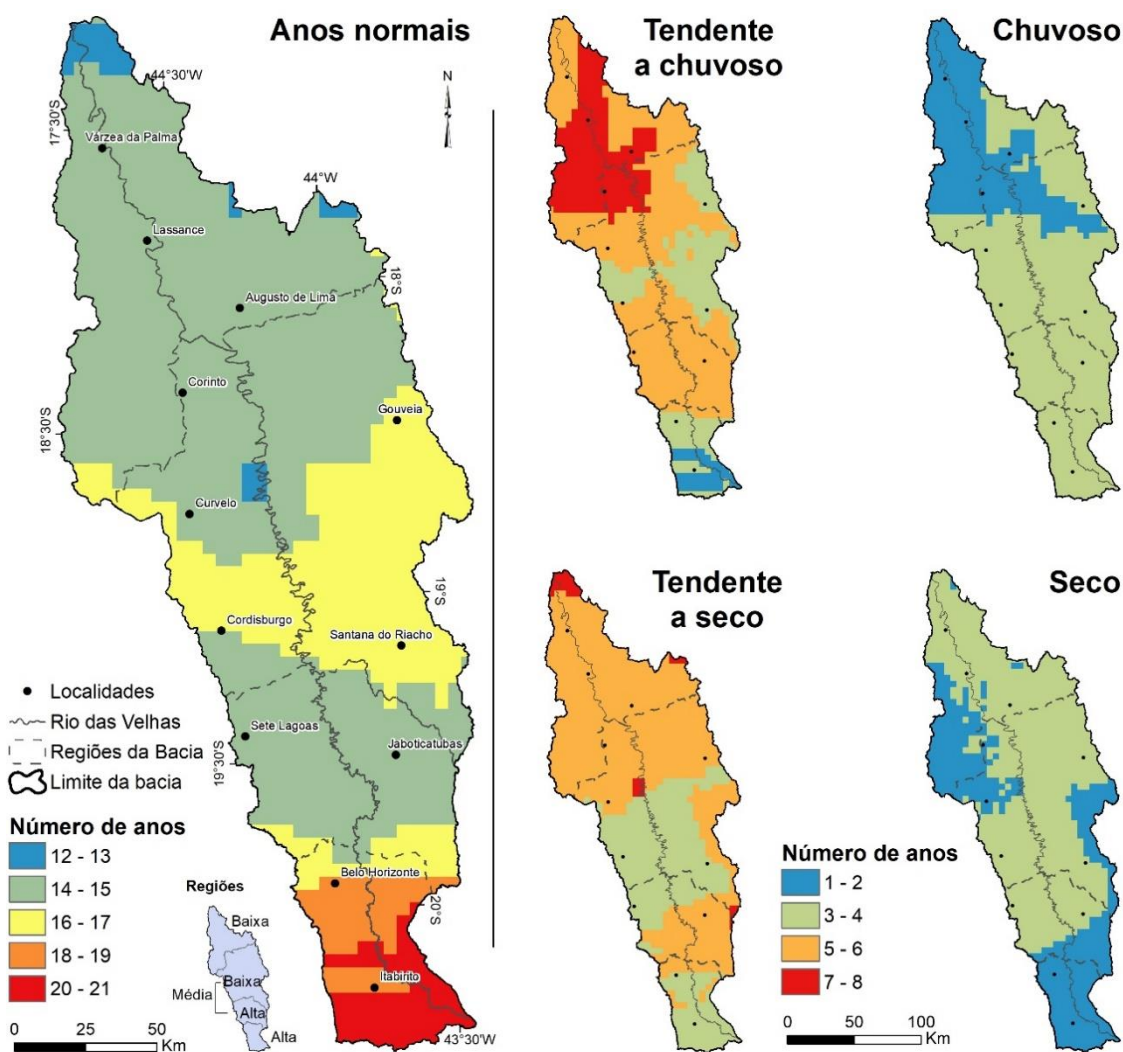


Figura 43: Número de anos padrão na bacia hidrográfica do Rio das Velhas de 1961 a 1990.

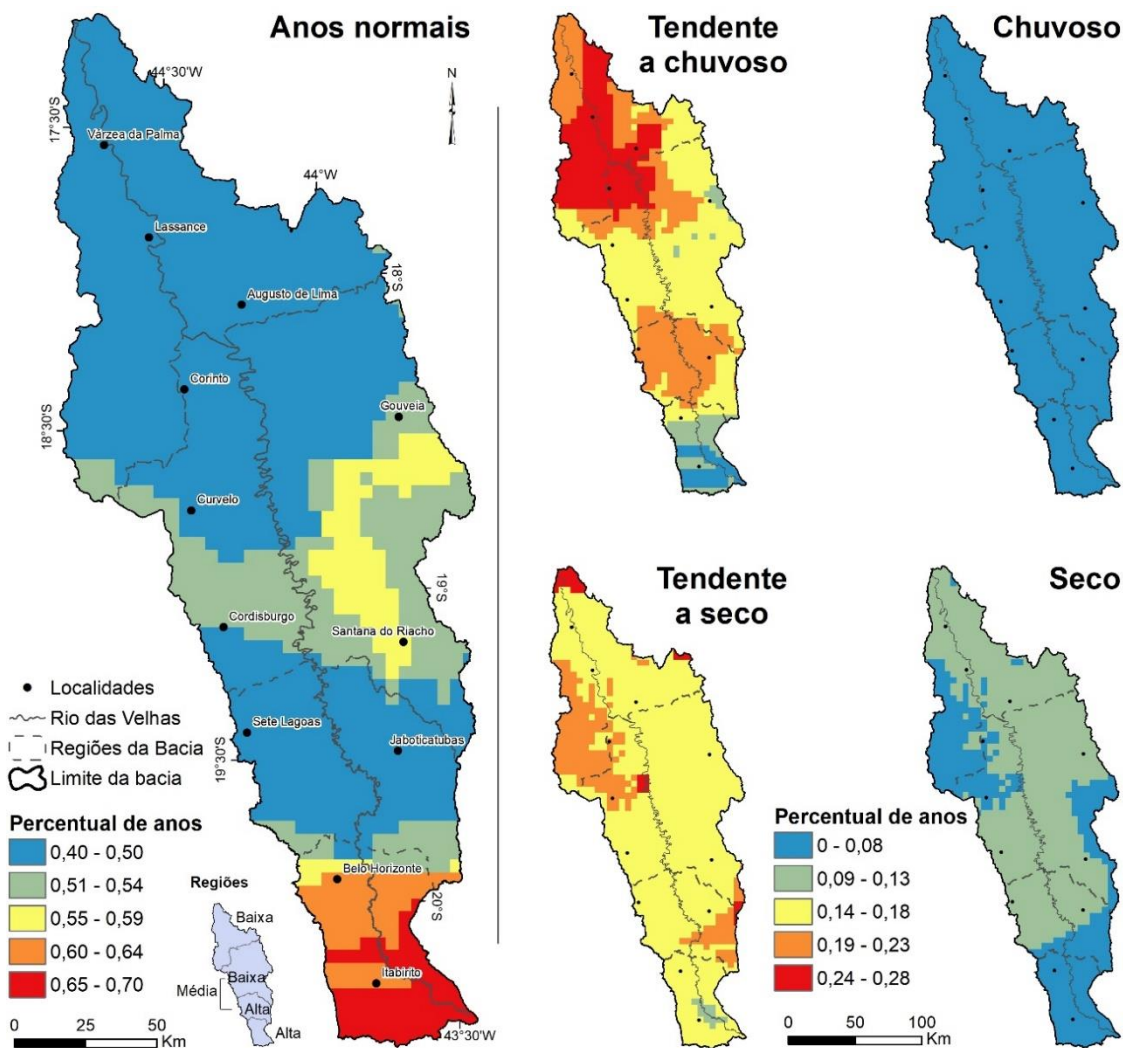


Figura 44: Percentual de anos padrão na bacia hidrográfica do Rio das Velhas de 1961 a 1990.

Assim, em um ano normal a precipitação no Velhas varia entre 779,6mm e 1801,6mm anuais, sendo a alta bacia e a região da Serra do Espinhaço as áreas mais chuvosas (Figura 45). Nos anos chuvosos, a precipitação média eleva-se como um todo na bacia podendo chegar a até 2312,6mm nas áreas mais elevadas (Figura 45).

Na alta bacia e em parte do município de Belo Horizonte mais próxima da Serra do Curral, onde as declividades são mais elevadas, esse alto volume de precipitação associado a solos friáveis, impermeabilização da superfície, canalização de drenagens naturais e ocupação de áreas de encosta, pode gerar danos à população na forma de deslizamentos e enchentes que trazem prejuízos econômicos e perda de vidas (BORSAGLI, s.d.). Importante ressaltar que esses problemas são recorrentes na alta bacia no período de maior precipitação, sobretudo dezembro e janeiro, mesmo nos anos padrão. Porém, em anos chuvoso ou tendente a chuvoso, essas, ocorrências podem ser mais intensas, como o caso dos anos de 1979 e 1983 que registraram grandes enchentes na

capital mineira e em outros locais do estado (FOLHA DE SÃO PAULO, 2003; NAZÁRIO e ANDRADE, 2010; WENECK, 2012).

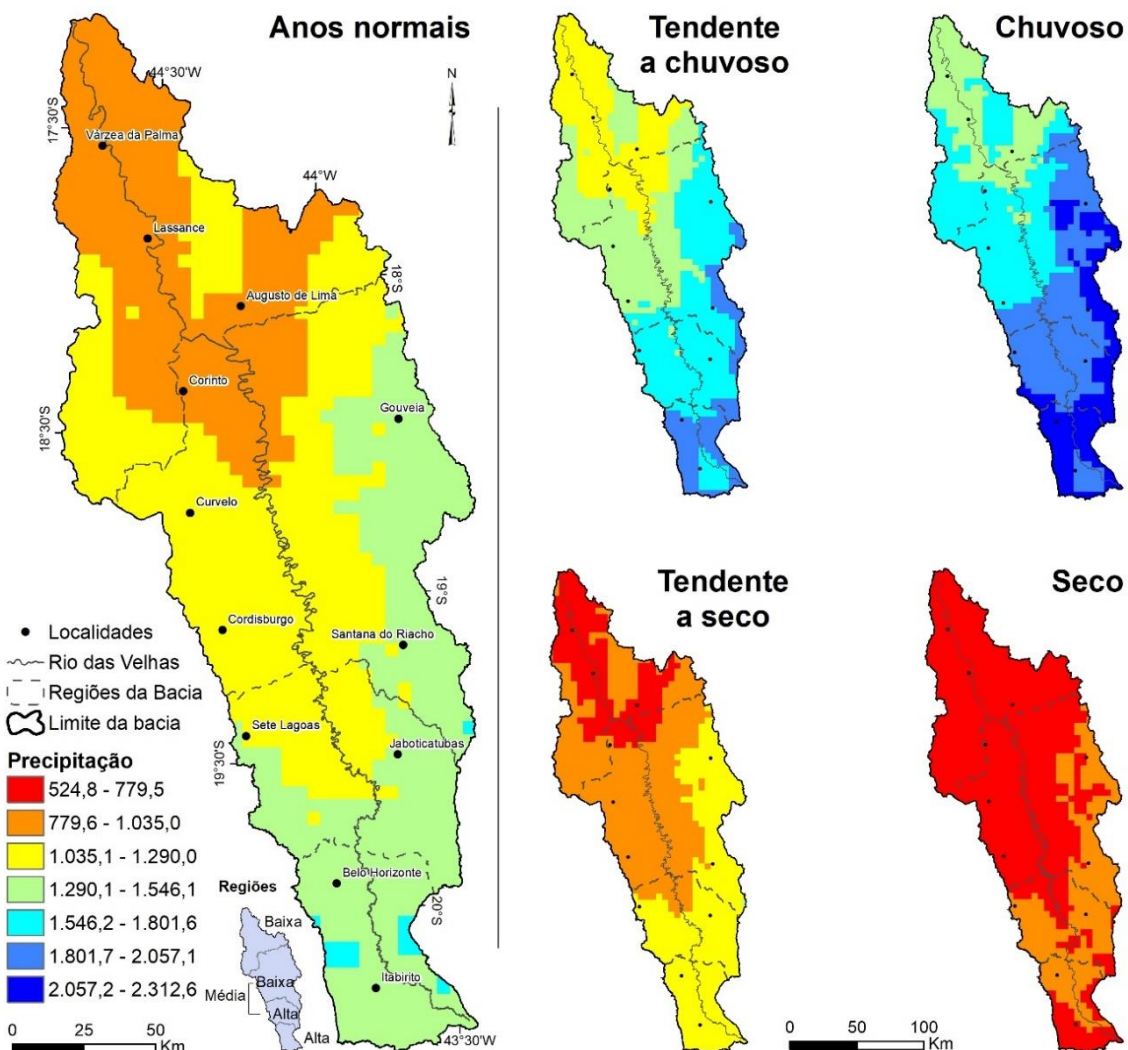


Figura 45: Precipitação anual acumulada média por ano padrão na bacia hidrográfica do Rio das Velhas de 1961 a 1990.

Nos anos chuvosos os meses de dezembro e janeiro apresentam precipitação acima da média registrada nos anos normais. No entanto, destaca-se o mês de janeiro nos quais a precipitação pode chegar ao dobro da esperada para o mesmo mês em um ano normal, como observado nos municípios de Itabirito, Belo Horizonte, Sete Lagoas e Santana do Riacho (Figura 46). Conforme aponta Oliva (2019), a conformação de eventos de precipitação concentrada como a ZCAS e a passagem de FF muito intensas são os responsáveis pela concentração de chuvas em eventos extremos.

É interessante destacar que nos anos chuvosos ou tendentes a chuvosos a precipitação eleva-se acima da média observada nos anos normais somente nos meses

que, normalmente, já apresentam maior precipitação (outubro a março). A estação seca (abril a setembro) permanece inalterada, com precipitação inexpressiva.

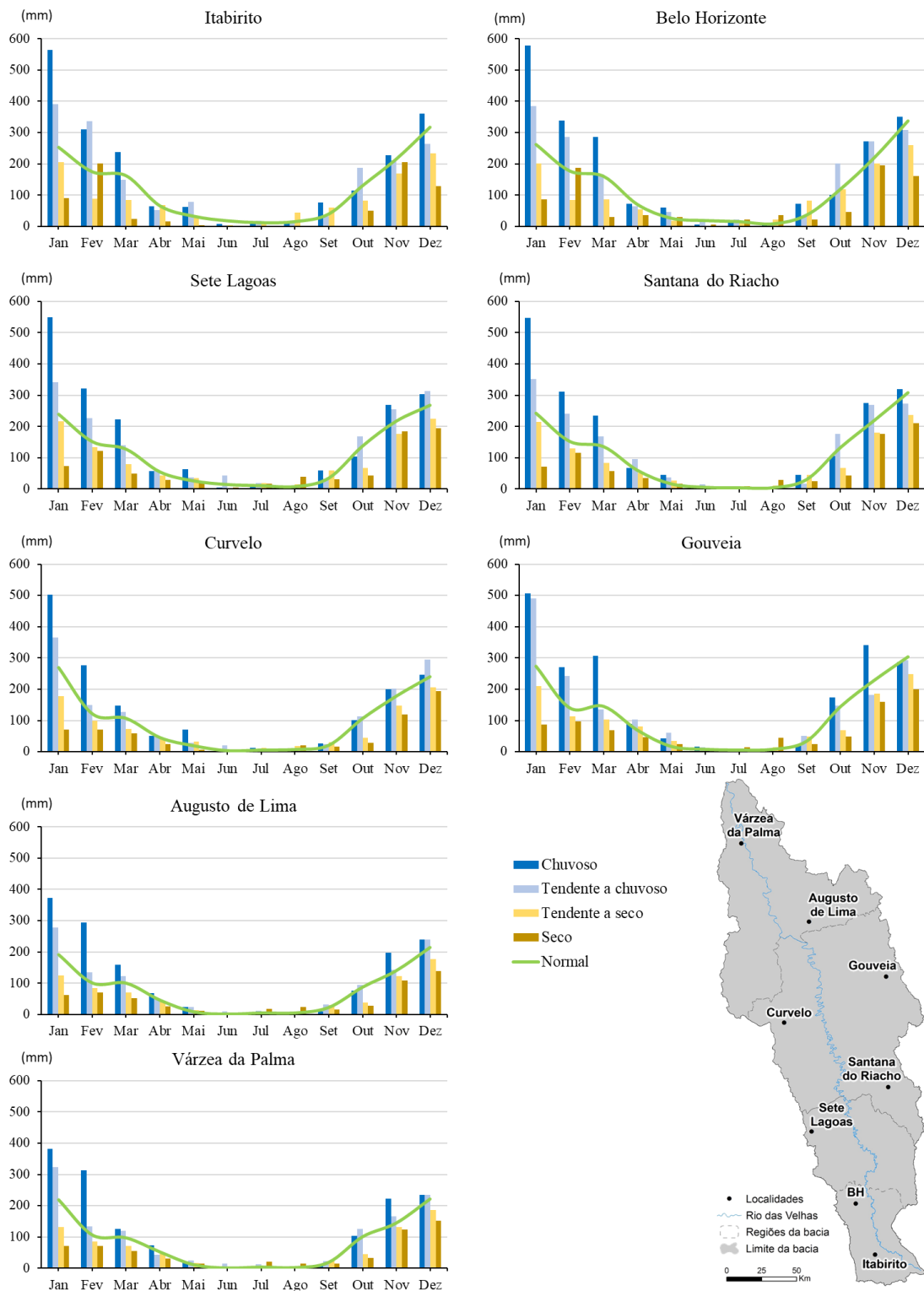


Figura 46: Precipitação média mensal por ano padrão (1961-1990).

Já nos anos secos ou tendentes a secos, também a estação chuvosa responde pelo desvio em relação aos anos normais, porém com redução expressiva da precipitação em relação à média dos anos normais. O mês de janeiro é o que apresenta maior redução na precipitação, um total que representa de 30 a 35% da precipitação de janeiro em um ano normal. Se por um lado a atuação em maior número ou mais intensa dos sistemas úmidos no verão acontece nos anos chuvosos, o inverso se estabelece com a inibição desses mesmos sistemas nos anos secos, podendo ocorrer estiagens no período chuvoso.

A precipitação na América do Sul, sobretudo nos extremos norte e sul, é afetada por fenômenos de tele conexão como a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e o El Niño Oscilação Sul (ENOS), que respondem, em parte, pela variabilidade anual da precipitação. No entanto, por estar localizada em uma zona de transição de atuação de sistemas atmosféricos tropicais e subtropicais, a região Sudeste apresenta baixa previsibilidade sobre os efeitos dos fenômenos ENOS e ODP (MINUZZI *et al.*, 2005). Apesar disso, foi realizada uma breve análise de possíveis influências desses fenômenos sobre as chuvas no Velhas, detalhada no apêndice IX. Em resumo, os fenômenos ENOS e ODP não explicam amplamente a variabilidade interanual da precipitação na bacia, porém dão sinais de influência sobre os totais pluviométricos anuais e trimestrais.

A associação entre fases coincidentes desses fenômenos favoreceu a precipitação na bacia, embora a associação ODP Quente e El Niño apresente precipitação maior do que ODP Fria e La Niña, com exceção dos trimestres OND-NDJ, ou seja, o início da estação chuvosa. Por outro lado, a associação de fenômenos com sinais opostos tende a diminuir a precipitação, mantendo-se, nesse caso, todos os trimestres mais chuvosos na ODP Quente/El Niño. Algo interessante a se destacar é o fato de que a precipitação trimestral tende a ser maior nos períodos em que há ODP Quente, porém associada a períodos neutros do ENOS do que em outras associações entre esses fenômenos. Destaca-se os anos de 1978 e 1979, tendente a chuvoso e chuvoso, respectivamente, com totais pluviométricos elevados no período chuvoso que resultaram em uma das maiores enchentes ocorridas na capital mineira (WERNECK, 2012).

Foi observado que há a ocorrência de ENOS/ODP em fases coincidentes e opostas nos anos normais, porém predomina a ODP Fria nesses anos, assim como La Niña/ODP Fria nos mesmos. Os anos secos apresentaram maior influência da ODP Fria em associação com o El Niño, enquanto os anos chuvosos estiveram sob influência majoritária da ODP Quente, principalmente em associação com o El Niño. Mais uma vez

houve um indício de que os fenômenos de fases opostas tendem a diminuir a precipitação, assim como os de fase coincidente tendem a aumentar.

4.1.2 Temperatura e Radiação Solar

A temperatura do ar na bacia hidrográfica do Rio das Velhas apresenta, assim como a precipitação, uma relação forte com a altitude, uma vez que essa favorece o arrefecimento adiabático da atmosfera. Assim, as áreas mais elevadas da bacia apresentam temperaturas mais brandas em relação às áreas rebaixadas do relevo. A posição latitudinal também é um fator importante, já que esta determina o caminho anual aparente do sol, condicionando intensidades distintas da insolação ao longo do ano que respondem pela variação mensal das médias térmicas (Figura 47).

A temperatura média anual na bacia varia espacialmente de 15,4°C a 22°C (Figura 48). No alto Velhas até a RMBH as temperaturas elevam-se rapidamente à medida em que se diminui a altitude (Figura 37). A partir da RMBH até a foz do rio principal a temperatura aumenta gradativamente. Por outro lado, nos transectos longitudinais a temperatura tende a variar de acordo com a altitude local (Figura 38). Assim, no alto Velhas ela tende a ser menor nas bordas leste e oeste da bacia, enquanto no médio e baixo Velhas é menor nas bordas leste da bacia, aumentando em direção à borda oeste. Aí também se destaca a proeminência da Serra do Cabral que tem um efeito importante sobre as chuvas e a temperatura do ar, tendo uma média até 2°C mais baixa que os arredores.

A variação mensal da temperatura média está intimamente relacionada à posição latitudinal da bacia. Uma vez que a bacia se encontra entre os paralelos de 17 e 20°, os raios solares estabelecem o zênite sobre a superfície do Velhas duas vezes ao ano. Considerando-se a distância dos extremos da bacia do Trópico de Capricórnio e o solstício de verão no hemisfério sul, que ocorre por volta do dia 21 de dezembro, o zênite acontece ao longo da bacia de 27 de novembro (extremo norte da bacia) a 8 de dezembro (extremo sul) e de 3 (extremo sul) a 15 de janeiro (extremo norte). Assim, novembro e janeiro apresentam maior radiação solar distribuída pela superfície da bacia, influenciando nas temperaturas mais altas nessa época do ano. Por outro lado, no mês de junho, quando ocorre o solstício de inverno, a intensidade da radiação sobre a bacia diminui concomitantemente à participação mais frequente da Massa Polar Atlântica (Anticiclone Polar Migratório), determinando a redução das médias térmicas. Enquanto no verão a temperatura média chega a 24,6°C, no inverno ela não passa de 19,2°C, podendo atingir média de 12°C nas áreas mais elevadas da bacia em junho e julho.

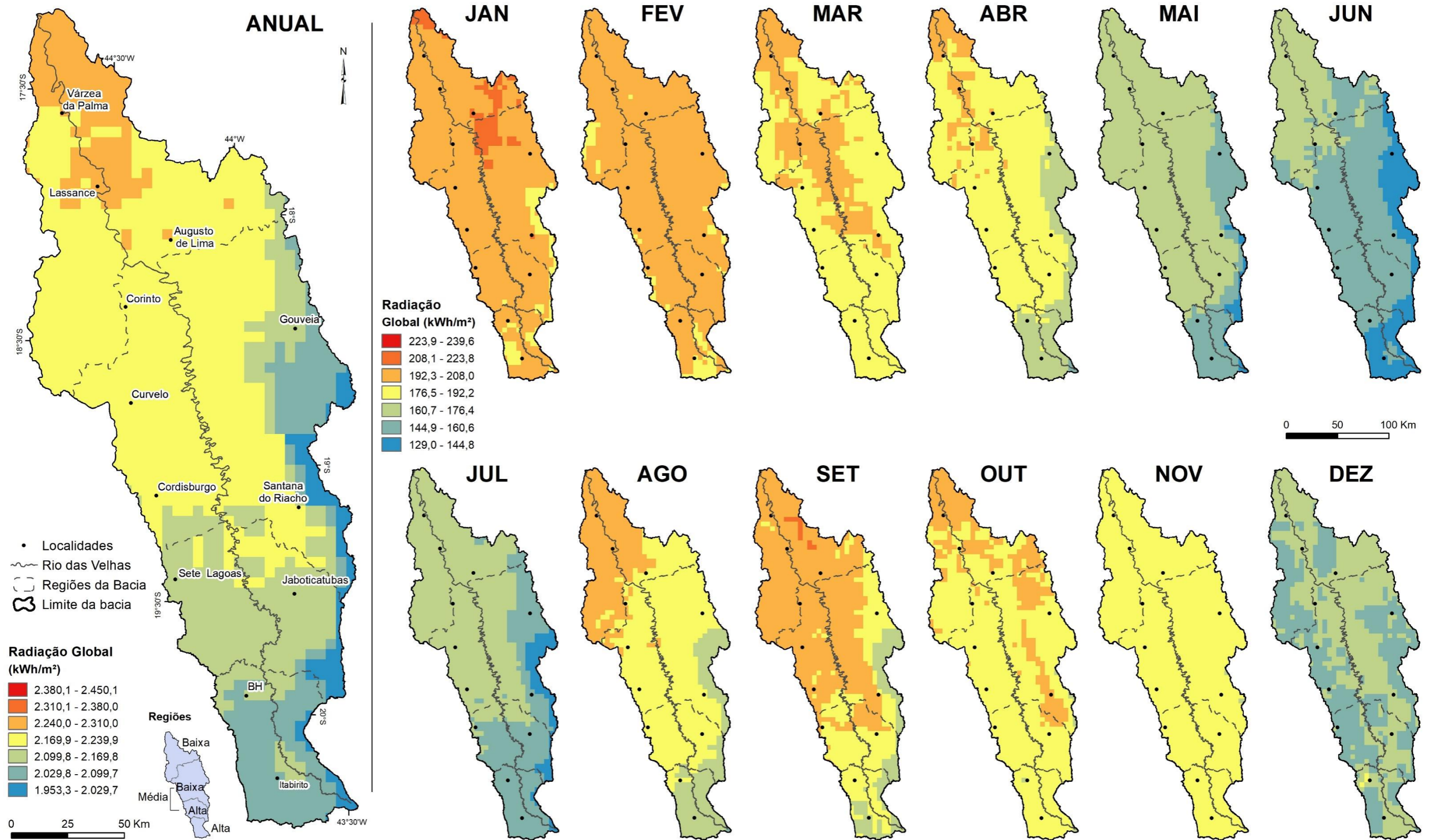


Figura 47: Radiação solar média na bacia hidrográfica do Rio das Velhas no período de 1961 a 1990.

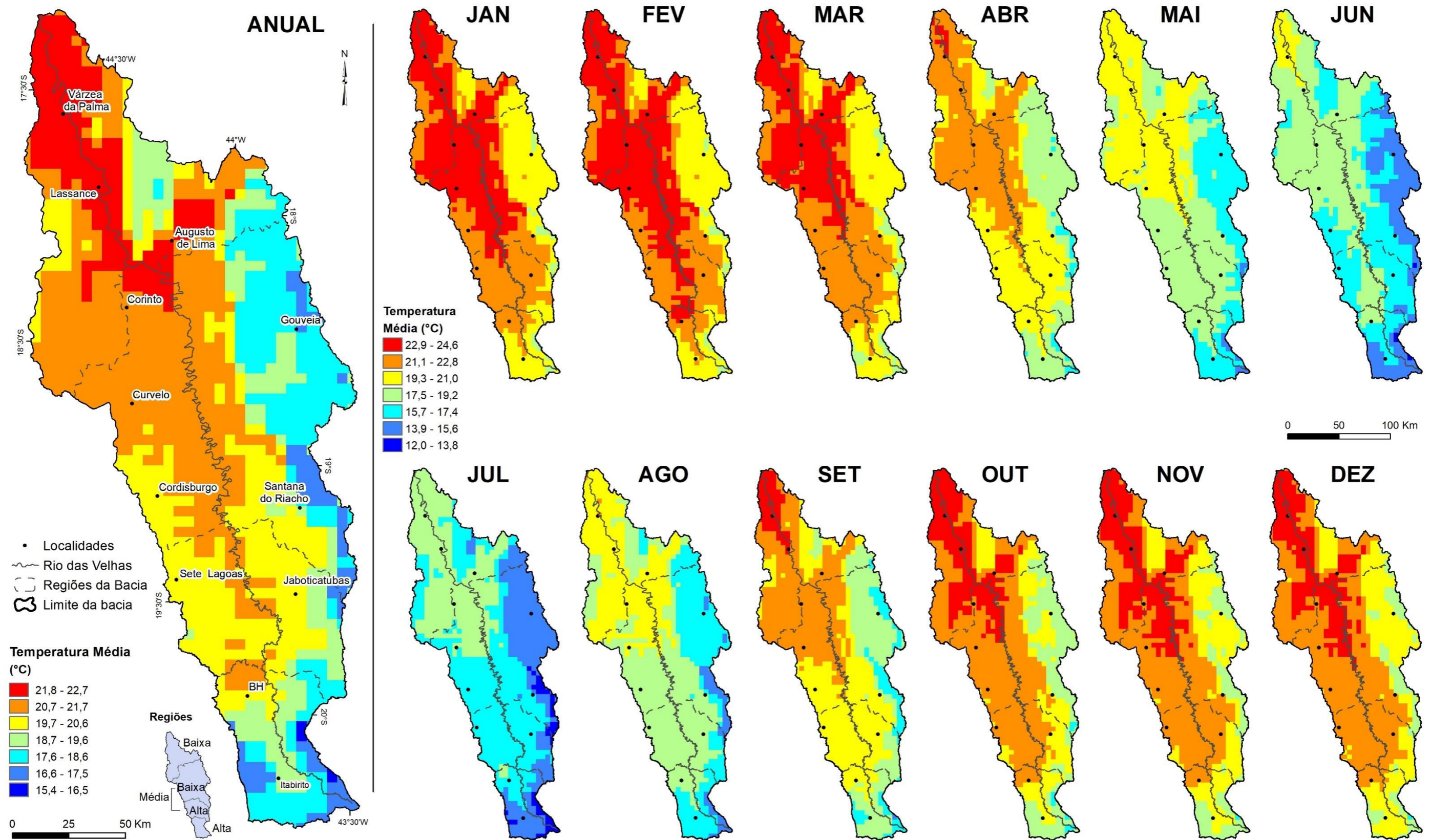


Figura 48: Temperatura média na bacia hidrográfica do Rio das Velhas no período de 1961 a 1990.

Quanto à relação entre o uso e cobertura da terra e temperatura, a análise estatística da correlação entre os dados demonstrou baixo índice de correlação entre elas (abaixo de 20%). Interessante observar que a área com a maior cobertura florestal da bacia, o alto Velhas, apresenta temperaturas médias semelhantes à região da Serra do Espinhaço onde a cobertura predominante é de campos de altitude e afloramentos, onde os portes arbóreos restringem-se ao entorno de cursos d'água. Isso demonstra que o efeito arrefecedor da altitude predomina sobre a cobertura da terra em um nível regional/local na bacia.

A resolução espacial dos dados meteorológicos utilizados neste trabalho não permite conclusões a níveis topo e microclimáticos. No entanto, é conhecido que nessas escalas os ambientes florestais são mais confortáveis à experiência humana por serem mais frescos durante o dia e menos afetados pelos ventos durante a noite, conforme foi observado nos experimentos de Machado *et al.* (2014), Machado e Assis (2015) em áreas elevadas do alto Velhas e no Parque Nacional da Serra do Cipó, inserido na Serra do Espinhaço. Assim, a princípio, o efeito do uso da terra sobre a distribuição da temperatura média do ar na bacia relaciona-se a escalas climáticas não abordadas neste trabalho.

Uma exceção visível na média térmica anual é a porção RMBH ao norte de Belo Horizonte, onde o efeito da extensa malha urbana conurbada entre os municípios da região pode provocar a elevação da temperatura que assemelha termicamente a região às áreas rebaixadas do médio e baixo Velhas. Ademais, Assis (2010) identificou em Belo Horizonte a existência de um mesoclima urbano, com núcleos de aquecimento que se destacam nas regiões mais ao norte e oeste do município. Considerando-se que estas são regiões conurbadas com os municípios vizinhos de Contagem, Ribeirão das Neves e Vespasiano e Santa Luzia, e que o clima, como fenômeno natural geográfico, não respeita os limites rígidos da cartografia, pode-se inferir que o clima urbano identificado em Belo Horizonte pode se estender para a malha urbana conurbada a este.

Esta relação do clima urbano com a temperatura do ar também pode ser observada na média da temperatura mínima anual (Figura 49). Observando-se os dados do INMET de temperatura média, mínima e máxima anual de 1961-2019, é possível observar que cidades com malha urbana extensa e crescimento urbano expressivo ao longo dessa série, apresentam uma tendência maior de acréscimo das temperaturas mínimas (Figura 50).

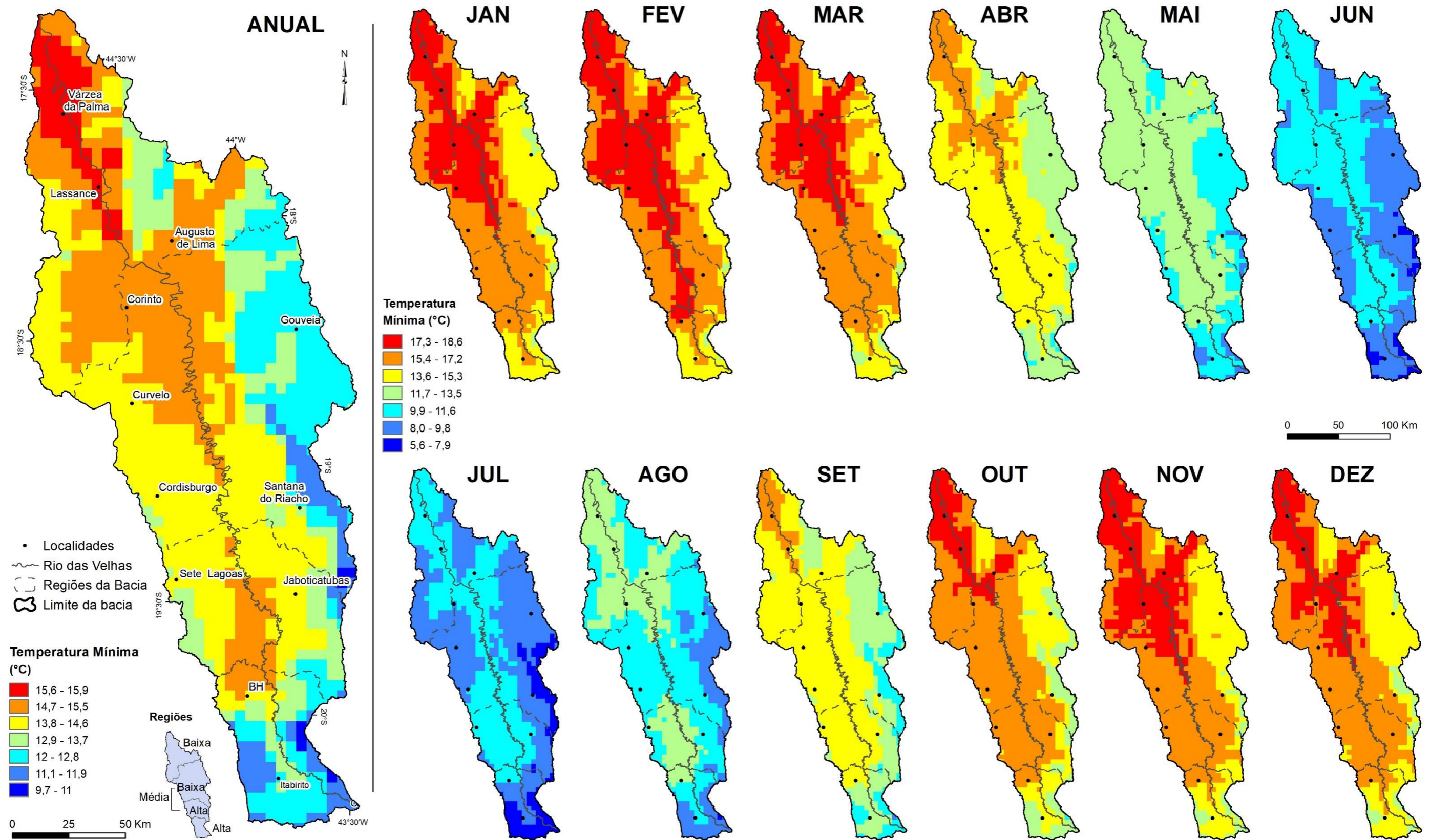
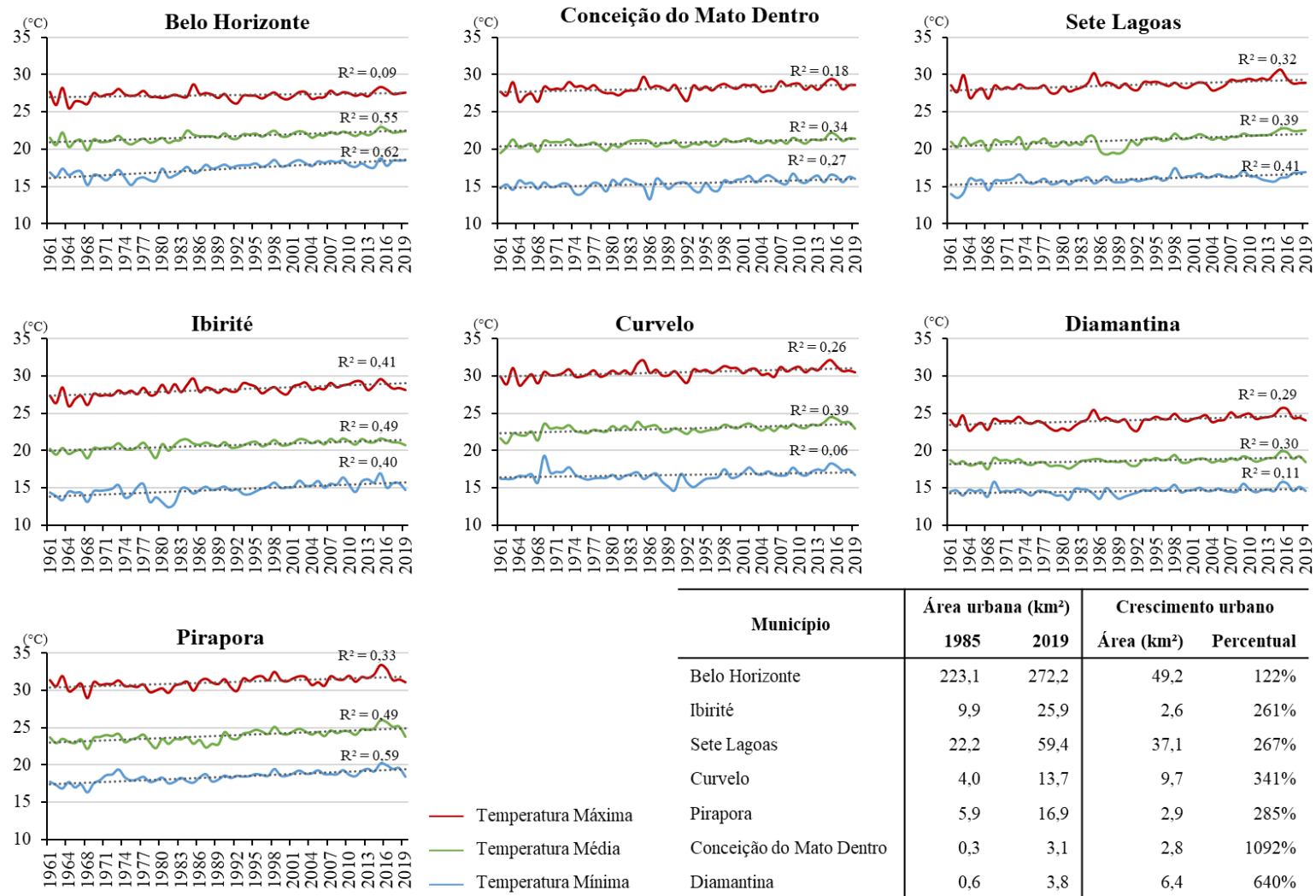


Figura 49: Temperatura mínima média na bacia hidrográfica do Rio das Velhas no período de 1961 a 1990.



Município	Área urbana (km²)		Crescimento urbano	
	1985	2019	Área (km²)	Percentual
Belo Horizonte	223,1	272,2	49,2	122%
Ibirité	9,9	25,9	2,6	261%
Sete Lagoas	22,2	59,4	37,1	267%
Curvelo	4,0	13,7	9,7	341%
Pirapora	5,9	16,9	2,9	285%
Conceição do Mato Dentro	0,3	3,1	2,8	1092%
Diamantina	0,6	3,8	6,4	640%

Figura 50: Temperatura média, mínima e máxima anual em municípios da bacia hidrográfica do Rio das Velhas (1961-1990). Fonte: INMET (2019).

Já a temperatura máxima não apresenta relação visual entre os dados (Figura 51), corroborando a bibliografia que indica que a temperatura mínima é mais sensível aos materiais que compõem a superfície urbana (ASSIS, 2010).

Embora na análise de correlação a temperatura mínima não tenha apresentado correlação com a latitude mais significativa que a máxima e média, a variável parece apresentar uma sensibilidade maior à redução da intensidade dos raios solares entre maio e agosto. Fica visível quando se observa as figuras 37 e 49 que demonstram que nos meses de junho e julho há uma queda generalizada das temperaturas na bacia. Ainda que o alto Velhas e o Espinhaço sejam as regiões mais frias nessa época do ano, com mínimas entre 5,6 e 9,8°C, as demais áreas da bacia atingem temperaturas mínimas entre 9,9 e 11,6°C, uma média apenas 1,8°C maior do que as áreas mais altas da bacia. Assim, enquanto a amplitude espacial da temperatura máxima média pode chegar a 9,2°C nos meses de junho e julho, a amplitude das mínimas não passa de 3,1°C nos mesmos meses. Não se pode excluir aí a influência conjunta da participação da massa Polar atlântica (mPa) nessa época do ano que, ao atravessar o território da bacia durante o inverno, é responsável por baixar as temperaturas até que, ao longo de sua passagem, tropicaliza-se dando espaço ao principal sistema atmosférico atuante nesta época do ano, o ASAS.

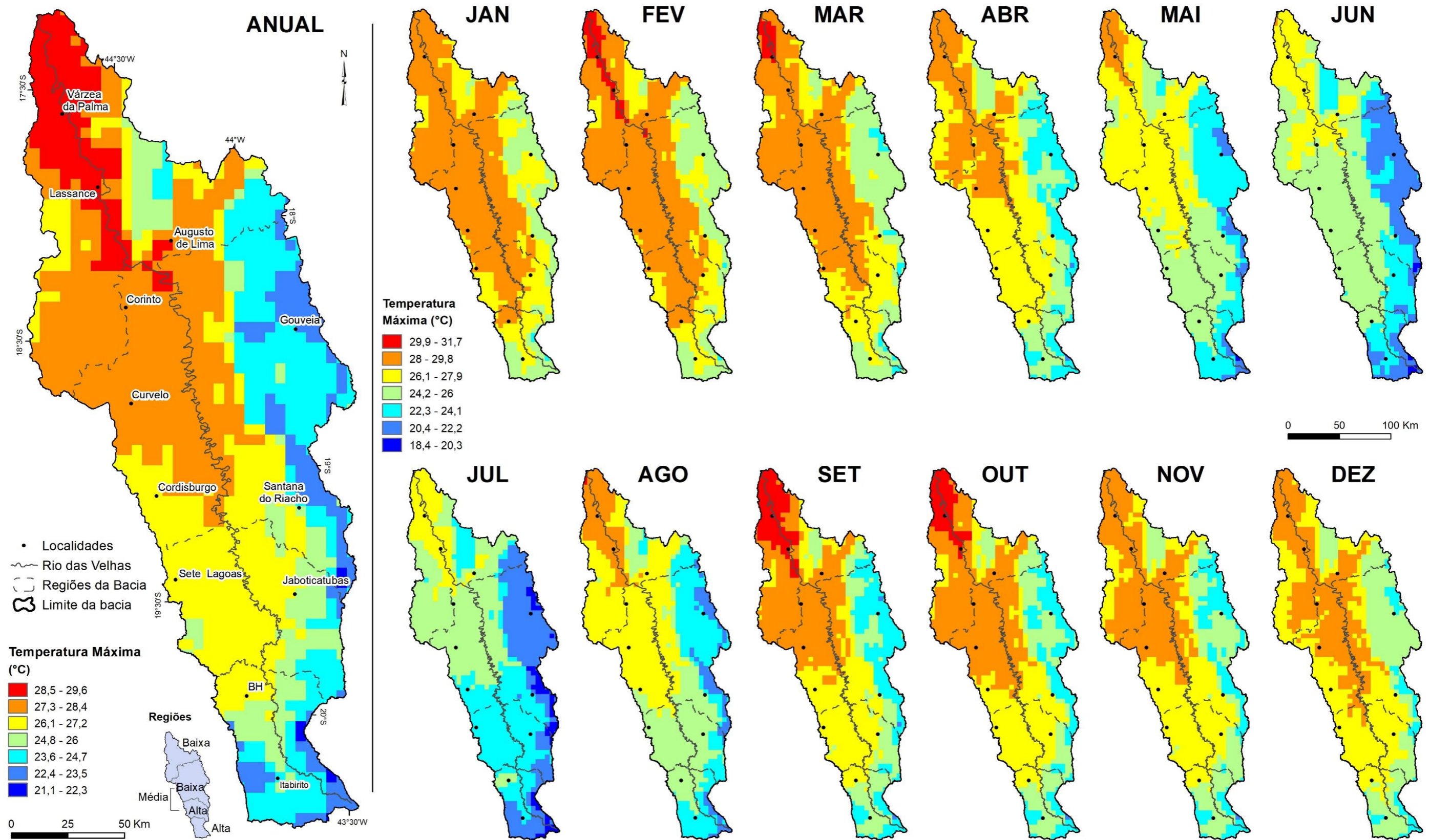


Figura 51: Temperatura máxima média na bacia hidrográfica do Rio das Velhas no período de 1961 a 1990.

4.2 Série histórica de 1991 a 2019

Os dados apresentados e analisados nesse tópico são referentes ao cálculo dos valores médios da série histórica de 1991-2019 utilizando-se os dados matriciais do projeto TerraClimate, bem como dados derivadas a partir dos originais. Neste capítulo é apresentada uma comparação das médias meteorológicas da série com as normais climatológicas de 1961-1990.

4.2.1 Precipitação e Velocidade dos Ventos

A distribuição espacial da precipitação média anual de 1991 a 2019 na bacia obedece aos mesmos padrões da normal climatológica de 1961 a 1990, onde as áreas de maiores altitudes apresentam totais mais elevados de chuvas do que as áreas rebaixadas da bacia (Figura 52). No entanto, o valor mínimo de precipitação na bacia reduziu cerca de 30mm anuais, assim como a áreas de abrangência das menores faixas de precipitação anual (873,3mm a 990,3mm e 990,4mm a 1102,2mm) estendeu-se pelo baixo Velhas. A precipitação máxima na bacia também teve um acréscimo de 22,7mm anuais e um pequeno aumento de sua área de abrangência. Interessante observar que as regiões norte e sul da bacia apresentaram este aumento das áreas de precipitação mínima e máxima, porém a área central da bacia, na qual a precipitação anual fica entre 1.214,3 e 1326,1mm, não apresentou alteração entre as séries de dados analisadas, mantendo-se como uma área de transição entre os locais mais chuvosos e mais secos da bacia.

As variações observadas nos totais pluviométricos refletem no balanço hídrico anual da bacia, que apresenta um déficit hídrico máximo de 90mm a mais do que a normal climatológica, além de uma extensão das áreas de maior déficit no baixo Velhas (Figura 53). Assim, nas áreas próximas a foz do rio o balanço hídrico anual pode chegar a -240,8mm. Nas áreas de maior excedente hídrico houve um acréscimo de 56,2mm no valor máximo, porém a extensão dessas áreas permaneceu semelhante à da normal climatológica. Esse pode ser um efeito da variabilidade anual da precipitação de 1991-2019, na qual houve menos anos chuvosos e tendente a chuvosos na bacia do que a série anterior (Apêndice X).

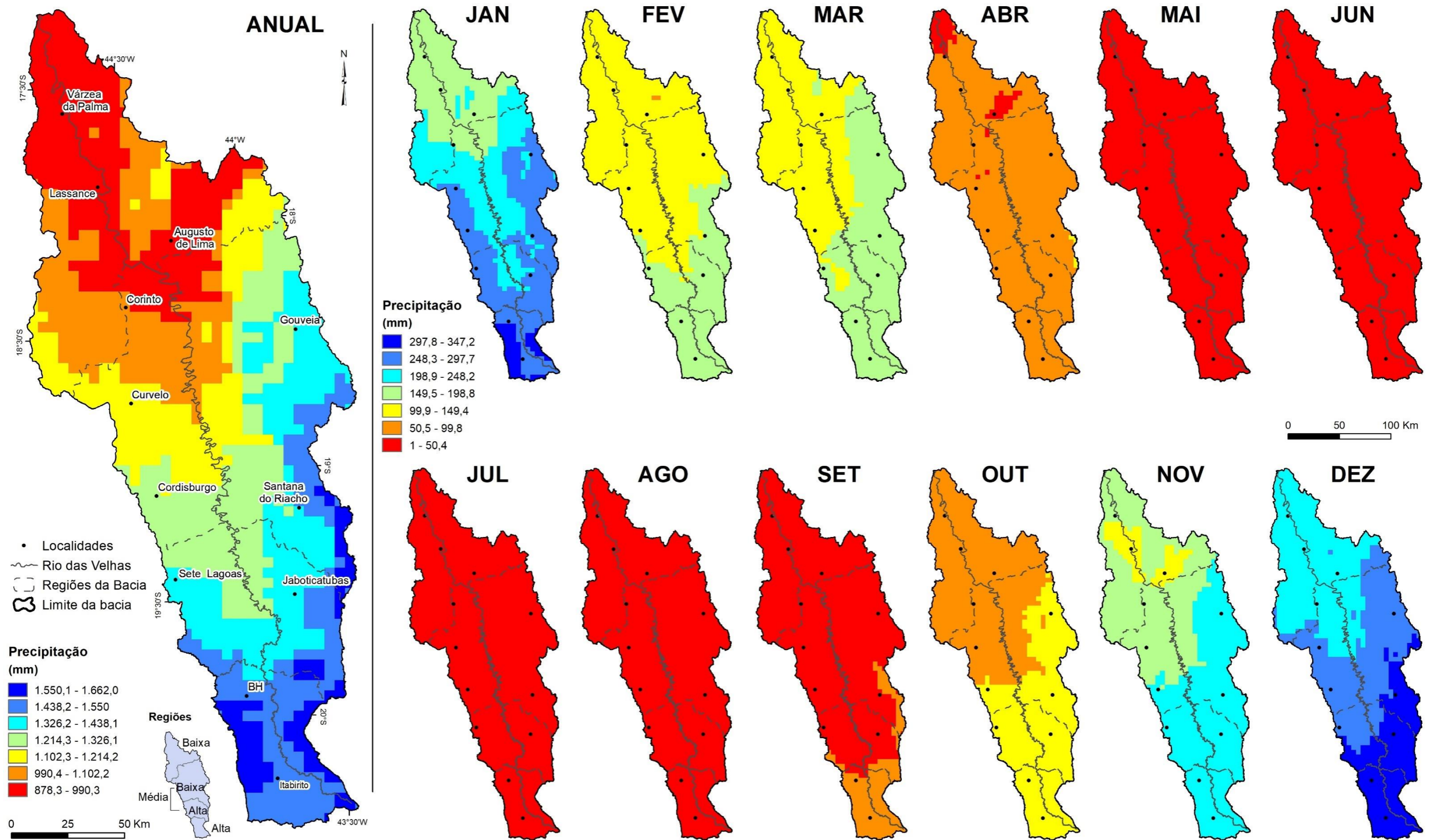


Figura 52: Precipitação acumulada média na bacia hidrográfica do Rio das Velhas no período de 1991-2019.

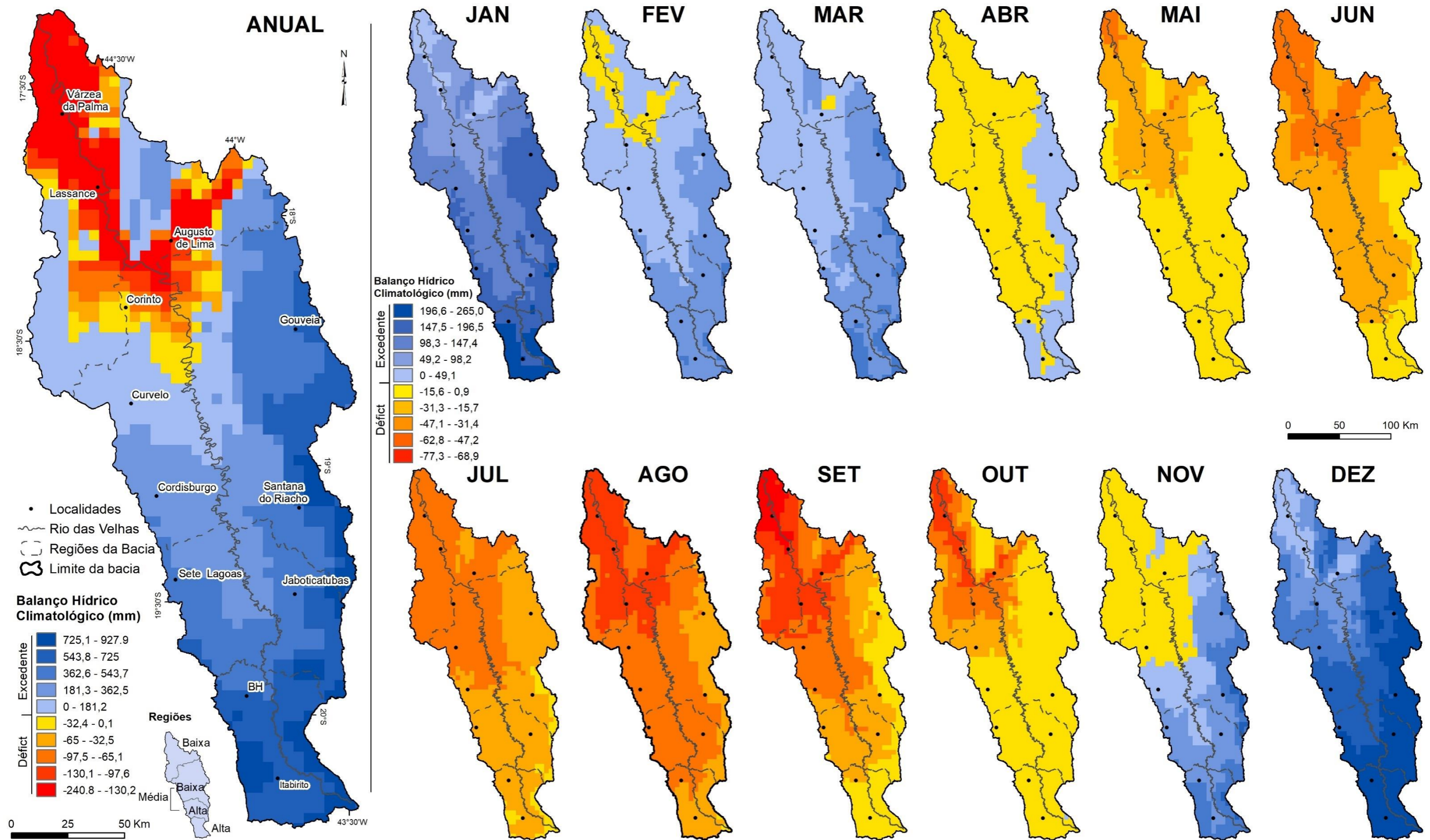


Figura 53: Balanço Hídrico Climatológico da bacia hidrográfica do Rio das Velhas no período de 1991-2019.

No que se refere à precipitação acumulada mensal, a existência de uma estação seca e outra chuvosa permanece bem definida. O mês de janeiro tornou-se mais seco no baixo e médio Velhas na série de 1991-2019 do que nas normais climatológicas de 1961-1990, porém, o trimestre de novembro a janeiro continua representando até 61% da precipitação anual em quase toda a bacia, variando de 46 a 55% apenas nas bordas mais elevadas do sul, sudeste e leste da bacia (Figura 54). O reflexo desta queda da precipitação em janeiro resultou na redução do excedente hídrico neste mês em quase toda a bacia, com exceção das áreas elevadas do Quadrilátero Ferrífero no alto Velhas, e o surgimento de uma área de déficit hídrico no baixo Velhas no mês de fevereiro.

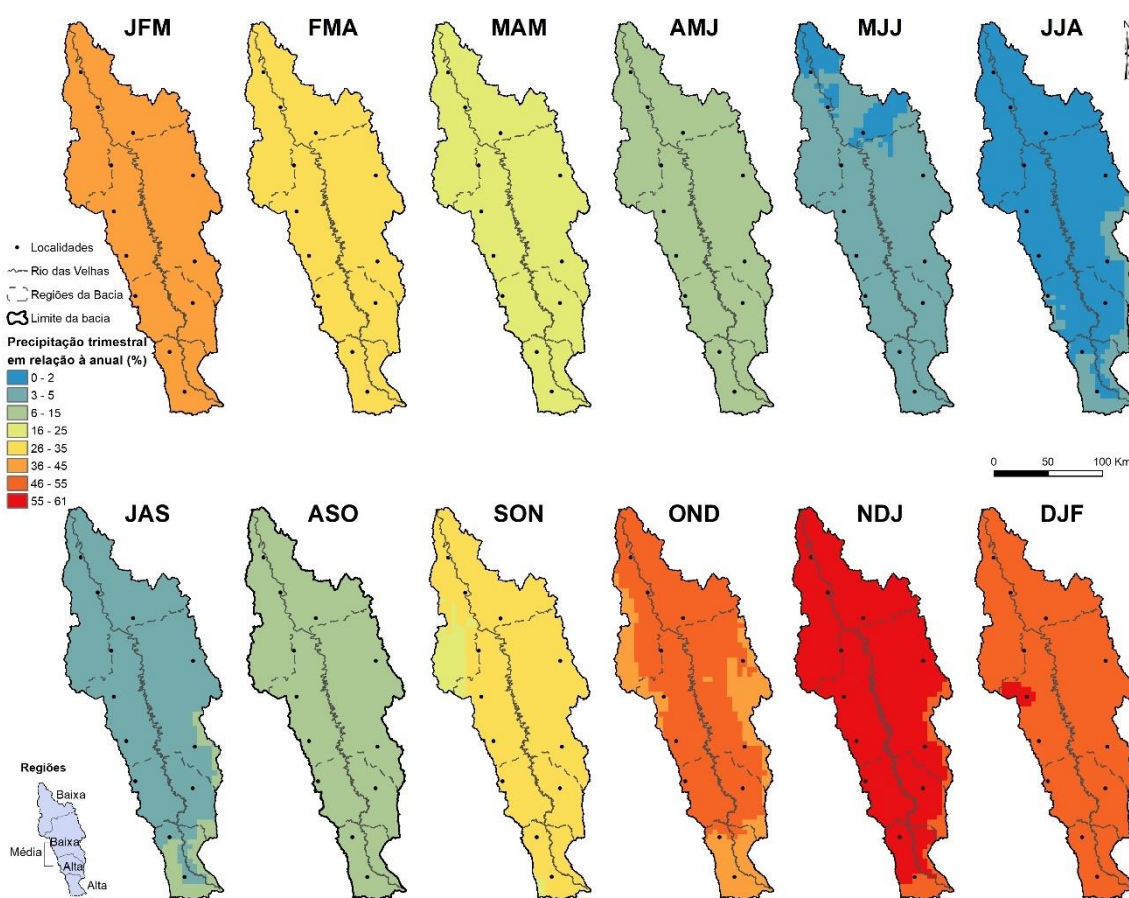


Figura 54: Percentual da precipitação trimestral em relação ao acumulado anual na bacia hidrográfica do Rio das Velhas no período de 1991-2019.

Os meses mais secos do ano (junho, julho e agosto) continuam representando no máximo 5% da precipitação anual da bacia, porém com uma extensão das áreas onde a precipitação acumulada nesses meses atinge no máximo 2% das chuvas anuais. O período de precipitação abaixo de 50,4mm mensais permanece entre os meses de maio a setembro, porém este último, que nas normais climatológicas estendia-se para toda a bacia com pequenas exceções no alto Velhas, passou a ter uma área no alto Velhas e parte do

Espinhaço onde a precipitação varia de 50,5 a 99,8mm. Esta variação resultou em um déficit hídrico no mês de setembro até 32,6mm menor do que nas normais nesta região, e a configuração do mês de setembro como chuvoso para uma área mais extensa que atinge parte do médio alto Velhas, e do médio baixo Velhas na região da Serra do Espinhaço em seus domínios. Assim, esta região passou de 5 meses secos no ano, para 4 meses secos (Figura 55).

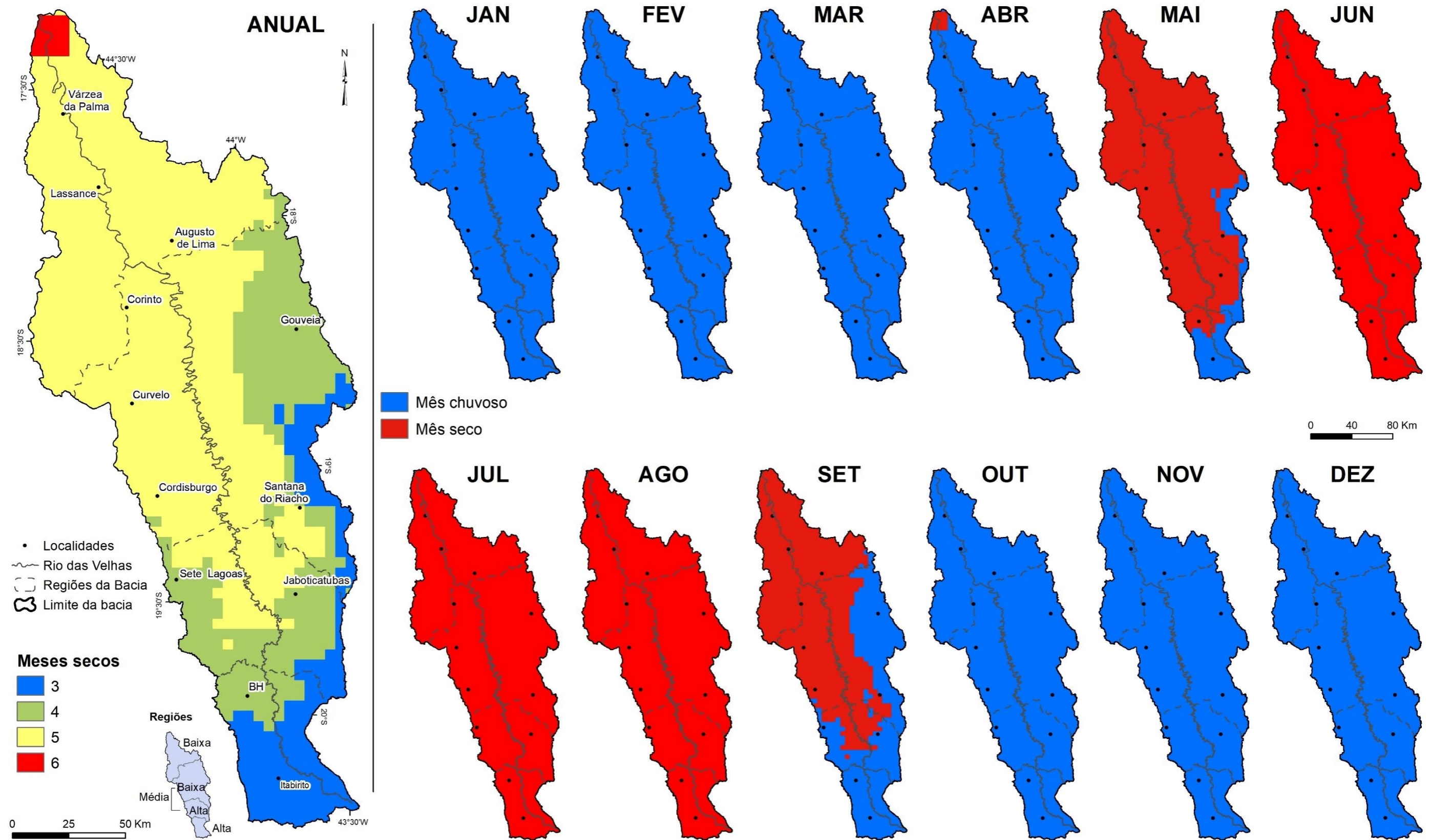


Figura 55: Meses secos na bacia hidrográfica do Rio das Velhas no período de 1991-2019.

A variabilidade interanual da precipitação na bacia manteve-se semelhante à da normal climatológica, no entanto houve um aumento das áreas de maior número de anos padrão que passaram a alcançar até partes do médio baixo Velhas. A alta bacia permaneceu como uma região onde o número e o percentual de anos normais é superior do que na baixa bacia, atestando a maior variabilidade da precipitação nas áreas próximas à foz do rio (Figuras 56 e 57). Assim, enquanto o alto Velhas e o médio baixo apresenta entre 60 e 69% de anos normais entre 1991-2019, a baixa bacia tem entre 45 e 50%.

Os anos chuvosos diminuíram na série de 1991-2019, o que pode ser um efeito do menor número de trimestres chuvosos sob influência da associação entre ODP Quente/El Niño e ODP Quente/ENOS Neutro, já que se demonstrou a elevação da precipitação nessas circunstâncias (Apêndice IX).

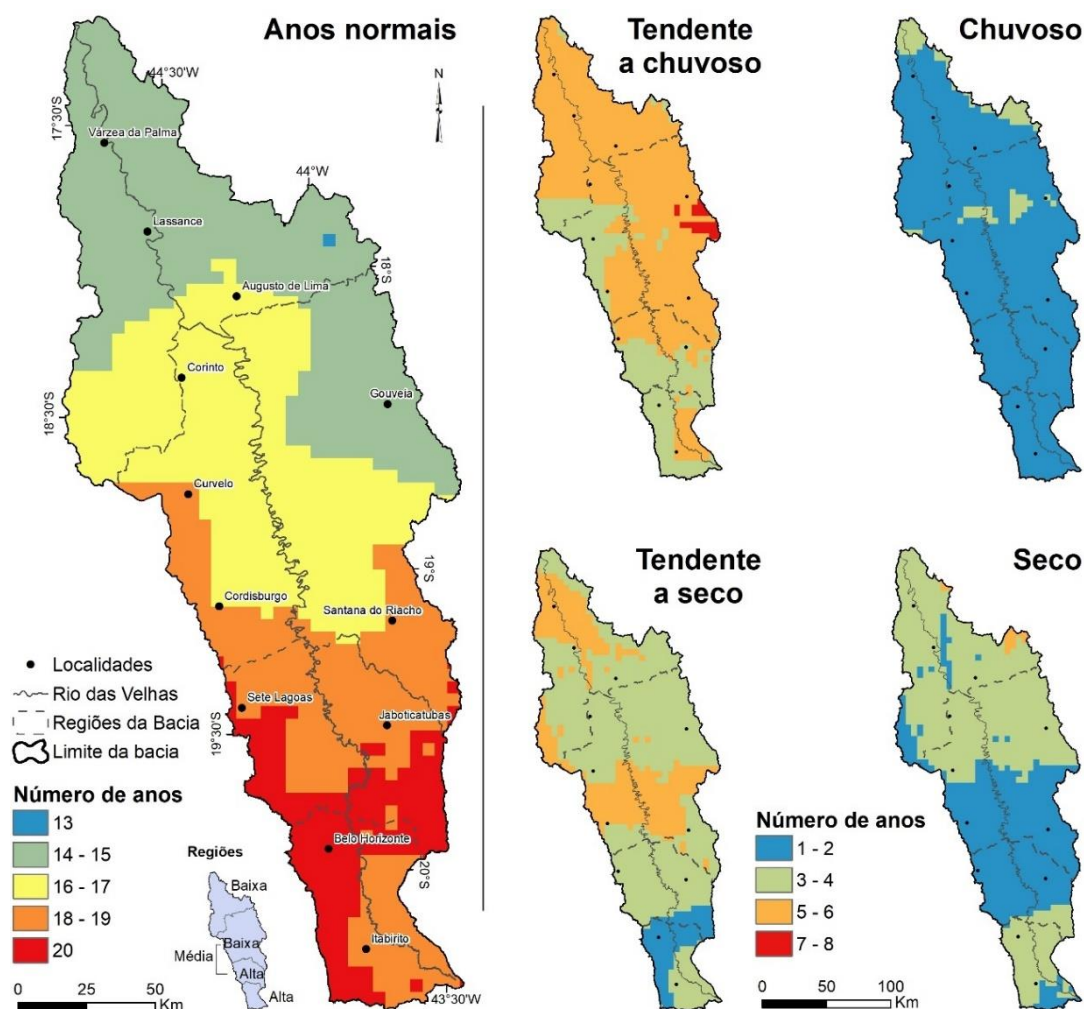


Figura 56: Número de anos padrão na bacia hidrográfica do Rio das Velhas de 1991 a 2019.

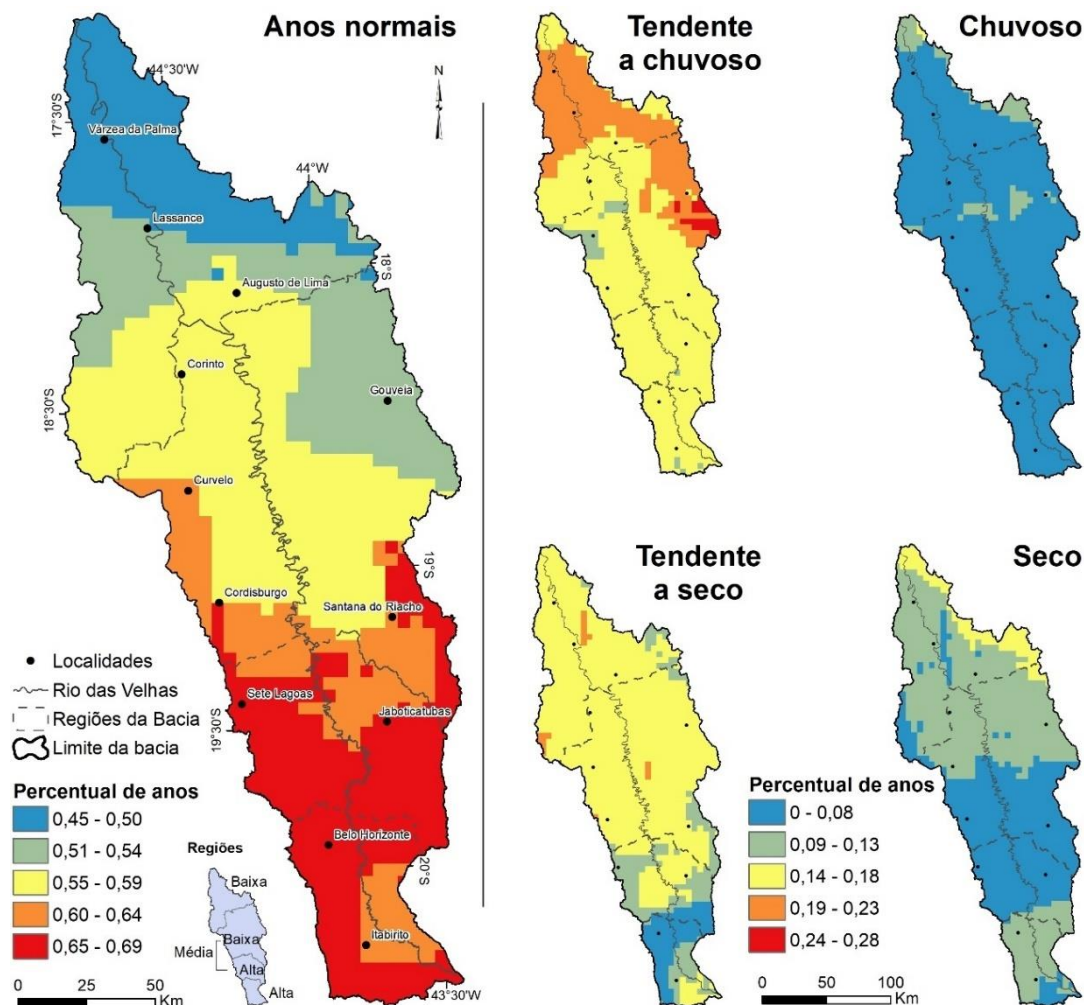


Figura 57: Percentual de anos padrão na bacia hidrográfica do Rio das Velhas de 1991 a 2019.

Destaca-se os últimos anos da série 1991-2019 que apresentaram uma sequência de anos secos e tendentes a seco (2014/2015/2017/2019) (Apêndice X). Nesse período houve uma associação entre ODP Fria, períodos prolongados do El Niño e períodos neutros do ENOS que favoreceram a queda de precipitação nos trimestres mais chuvosos, conforme observado pelas médias trimestrais por evento analisadas no apêndice IX.

Na série de 1991-2019, os anos chuvosos e tendente a chuvosos apresentaram o último mês do ano com maior precipitação, chegando a dobrar a precipitação em comparação com o mesmo mês nos anos normais (Figura 58). Possivelmente, há nesses anos maior participação da ZCAS, principal sistema atmosférico responsável pela precipitação de verão na bacia, e da passagem de outros sistemas atmosféricos instáveis, como as Frente Frias e as Linhas de Instabilidade. Já nos anos secos, o mês de janeiro destaca-se pela queda brusca das chuvas em relação aos anos normais, o que pode ser resultado de uma atuação mais pronunciada do ASAS nesses anos na estação chuvosa. Silva *et al.* (2017) observaram a prevalência desse sistema em dezembro de 2014 e janeiro

de 2015, determinando um período de 30 dias de tempo estável (veranico) em plena estação chuvosa.

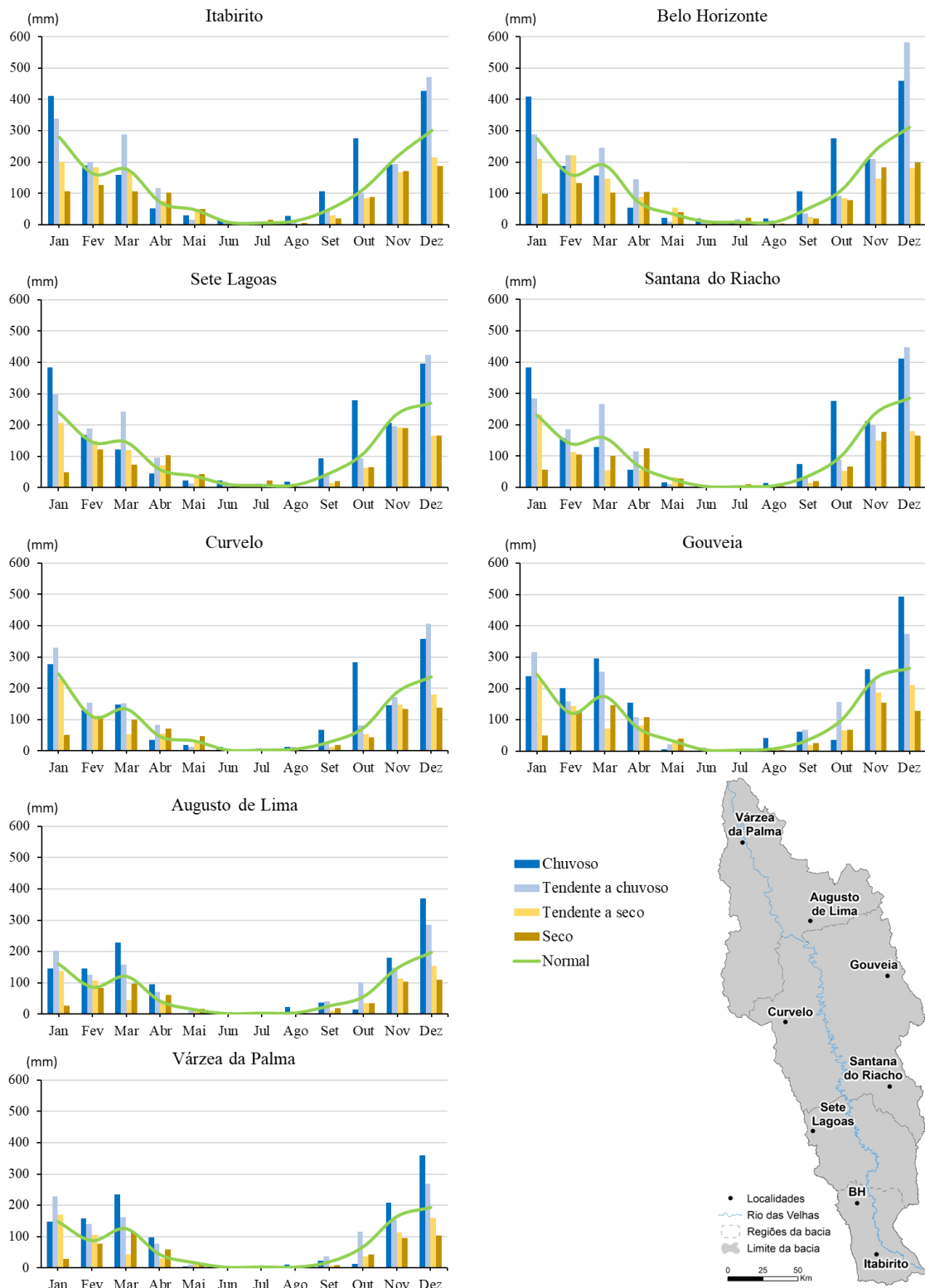


Figura 58: Precipitação média mensal por ano padrão (1991-2019).

4.2.2 Temperatura e Radiação Solar

Assim como o observado em relação à precipitação e a velocidade dos ventos na bacia, a temperatura do ar manteve o padrão de distribuição observado nas normais climatológicas nas quais as áreas mais altas da bacia apresentam temperaturas reduzidas em relação às áreas rebaixadas. De maneira geral, as áreas de temperatura mais baixa não apresentam diferenças importantes em relação às normais climatológicas, tanto espacialmente quando termicamente. Os valores mais baixos de temperatura média subiram de 15,4°C para 15,7°C, uma diferença de apenas 0,3°C, semelhante ao observado para a temperatura máxima, cujo acréscimo foi de 0,2°C (de 21,1°C para 22,3°C), e para a temperatura mínima que subiu 0,4°C (de 9,7°C para 10,1°C) (Figuras 59 a 61).

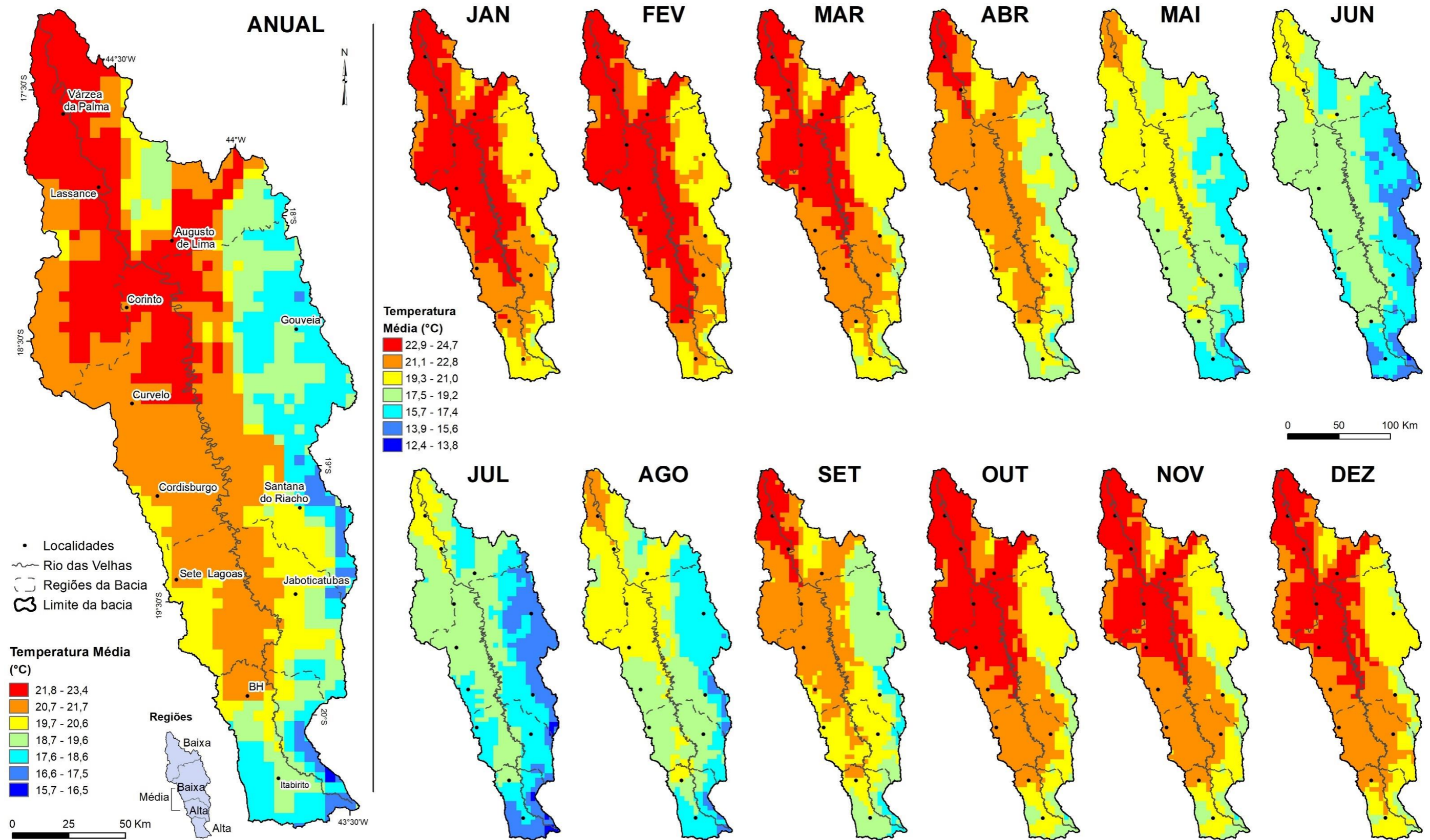


Figura 59: Temperatura média na bacia hidrográfica do Rio das Velhas no período de 1991 a 2019.

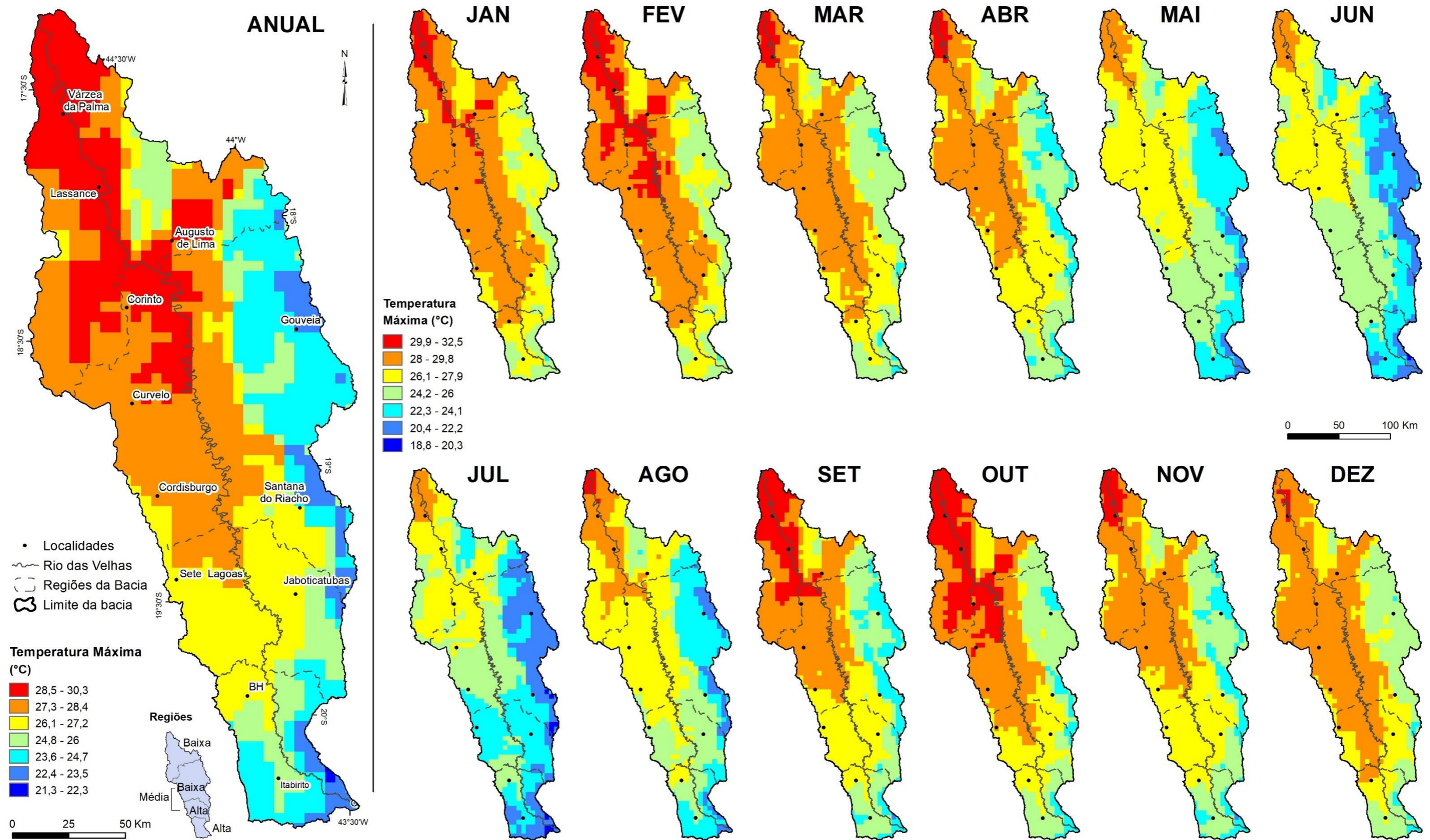


Figura 60: Temperatura máxima média na bacia hidrográfica do Rio das Velhas no período de 1991 a 2019.

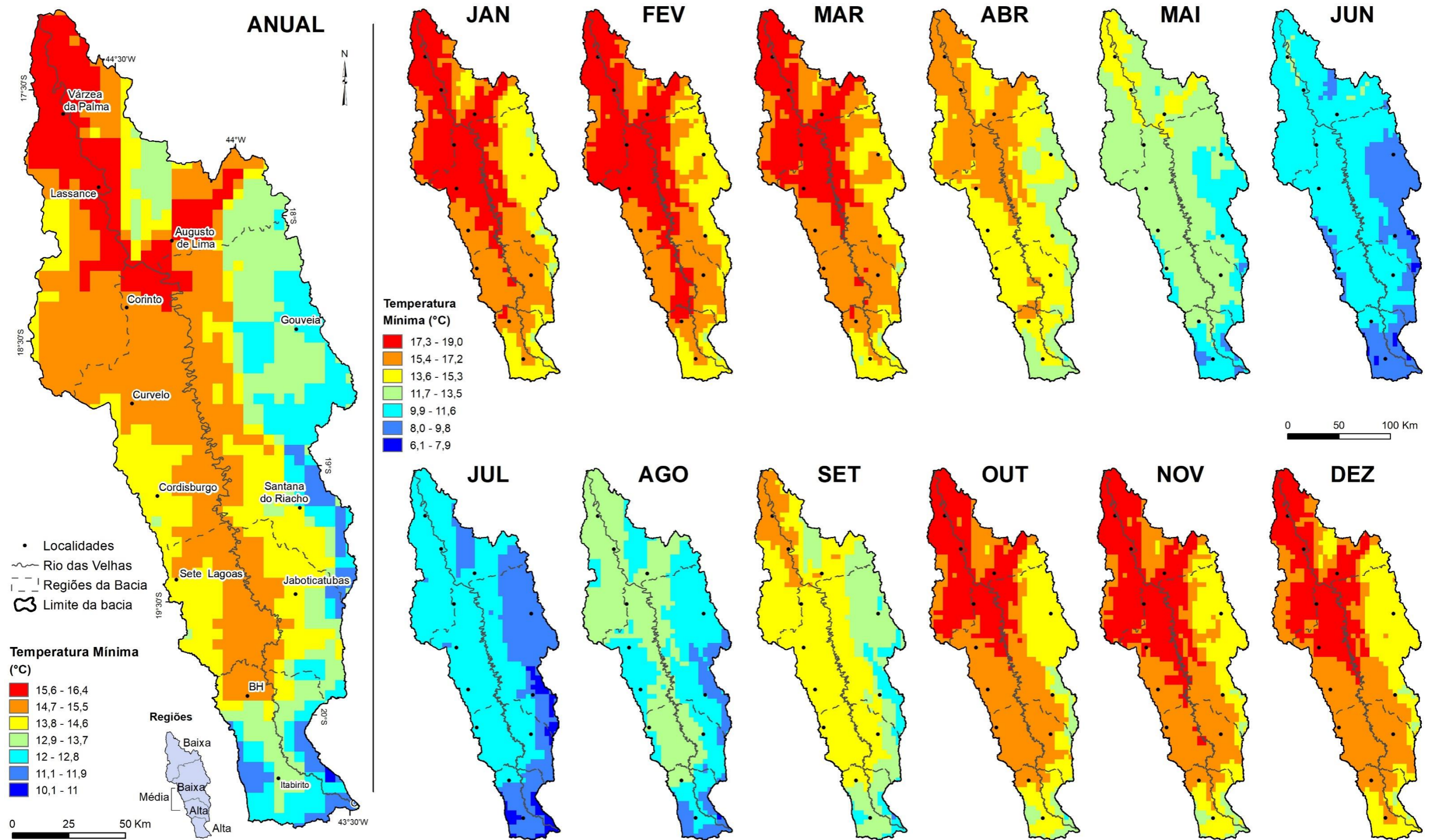


Figura 61: Temperatura mínima média na bacia hidrográfica do Rio das Velhas no período de 1991 a 2019.

Já os máximos de temperatura embora tenham subido $0,7^{\circ}\text{C}$ para as temperaturas máxima (de $29,6^{\circ}\text{C}$ para $30,3^{\circ}\text{C}$) e média (de $22,7^{\circ}\text{C}$ para $23,4^{\circ}\text{C}$) e $0,5^{\circ}\text{C}$ para a temperatura mínima (de $15,9^{\circ}\text{C}$ para $16,4^{\circ}\text{C}$), tiveram uma expansão das faixas mais elevadas como um todo. As faixas de maior temperatura máxima, que variam de $28,5$ a $30,3^{\circ}\text{C}$ que antes margeavam o rio até a altura do município de Corinto, passaram a abranger áreas além do curso d'água principal até o município de Curvelo e expandindo-se para noroeste da bacia até Augusto de Lima. Já as áreas de temperatura entre $27,3^{\circ}\text{C}$ e $28,4^{\circ}\text{C}$, segunda faixa mais quente, expandiu-se de Codisburgo para Sete Lagoas.

O mesmo padrão foi observado para a temperatura média na bacia, na qual a maior faixa térmica, que varia de $21,8^{\circ}\text{C}$ a $22,7^{\circ}\text{C}$ expandiu-se da região próxima a Corinto para até o município de Curvelo. Já as áreas de abrangência da faixa térmica que vai de $20,7^{\circ}\text{C}$ a $21,7^{\circ}\text{C}$ apresentou uma expansão mais significativa. Antes essa abrangia o médio baixo Velhas no entorno do rio principal até próximo a Jaboticatubas, voltando à mesma faixa de temperatura ao norte do município de Belo Horizonte. Já na série de 1991 a 2019, a média térmica abrange todo o entorno de BH e expande-se no entorno do rio até o município de Sete Lagoas.

Quanto às temperaturas mínimas, também foi observada uma expansão da faixa térmica mais elevada, de $15,6^{\circ}\text{C}$ a $16,4^{\circ}\text{C}$ que antes se restringia ao baixo Velhas nas áreas próximas à foz e no entorno do rio principal até o município de Lassance, e passou a atingir áreas do médio baixo Velhas próximo a Corinto e a noroeste da bacia no entorno do município de Augusto de Lima. Já a faixa térmica de $14,7^{\circ}\text{C}$ a $15,5^{\circ}\text{C}$ também apresentou uma expansão entre o médio baixo e médio alto Velhas, compreendendo área entre os municípios de Codisburgo e Sete Lagoas, incluindo a região no entorno de Belo Horizonte à mesma faixa térmica que vai até o baixo Velhas.

Ao longo do ano, as temperaturas apresentaram variação sazonal correspondente à sazonalidade do total de radiação que atinge a superfície na bacia, altamente correlacionada às latitudes da nascente à foz (Figura 62). Concomitantemente, a radiação se distribui de acordo com o relevo, onde as áreas mais altas apresentam menor insolação da superfície enquanto as áreas mais rebaixadas acumulam maior insolação.

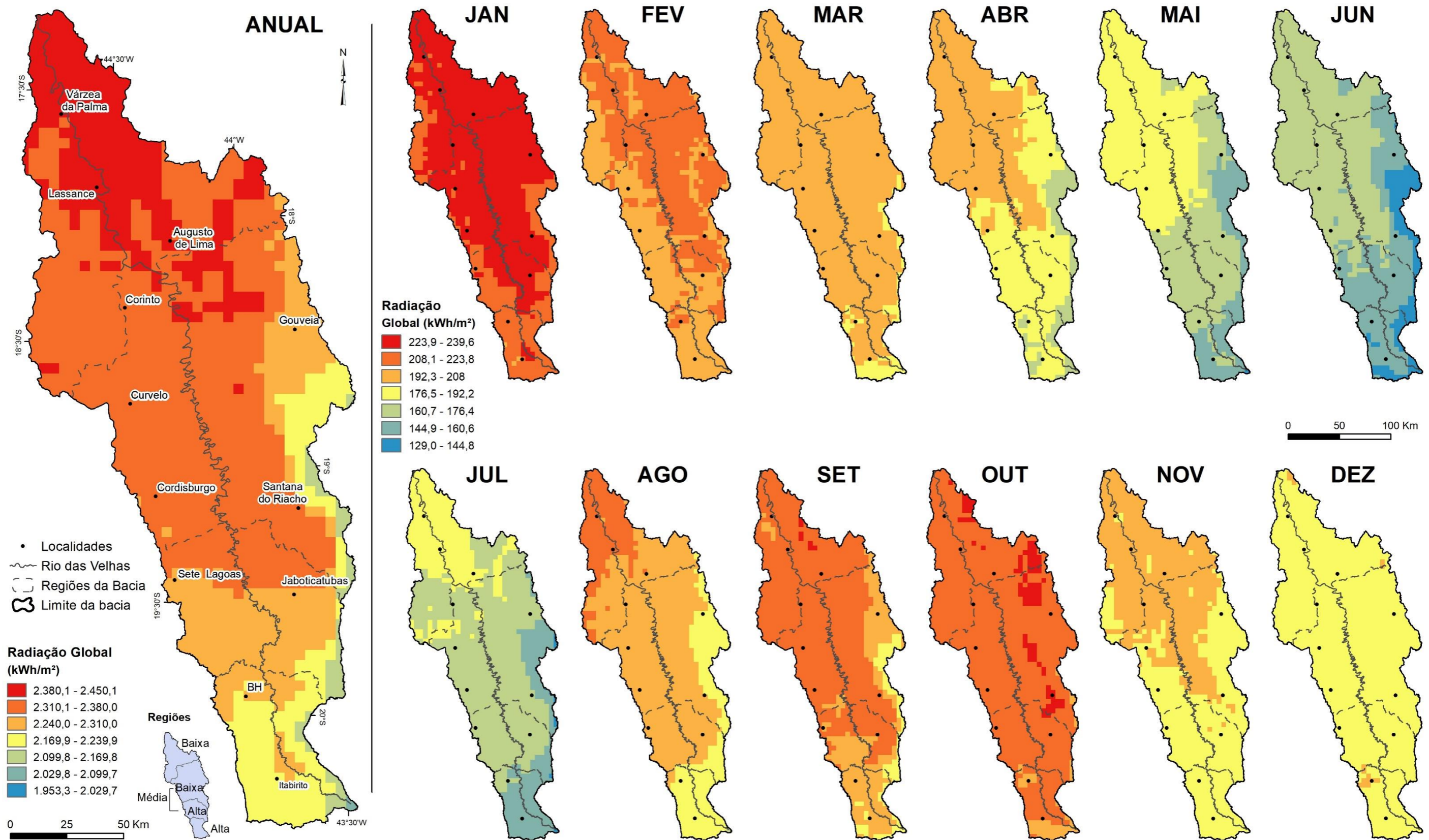


Figura 62: Radiação solar média na bacia hidrográfica do Rio das Velhas no período de 1991 a 2019.

As faixas de temperatura média mais baixas, que variam de 15,4°C a 18,6°C, permaneceram com distribuição espacial sem alterações significativas em quase todos os meses do ano. As exceções foram apenas os meses de junho e julho, nos quais as temperaturas médias mais baixas perderam espaço para a expansão da faixa de 18,7°C a 19,6°C ao longo do médio baixo e médio alto Velhas no entorno do curso d'água principal. As áreas próximas à foz do rio, no entorno dos municípios de Várzea da Palma e Lassance passaram a apresentar temperaturas médias no mês de julho até 1°C mais altas, variando entre 19,7°C e 20,6°C.

Já a faixa de temperatura média mais alta, que varia de 21,8°C a 23,4°C, apresentou uma expansão do mês de setembro até o mês de abril. Nos meses de setembro e abril essa expansão foi acompanhada por um aumento também da área de cobertura da segunda faixa térmica mais quente, onde as temperaturas variam de 21,1°C a 22,8°C.

As temperaturas máximas mais baixas, nas faixas entre 18,8°C e 24,1°C também não apresentaram modificações significativas, com exceção de junho e julho, onde também houve um aumento de até 1,2°C das temperaturas na região próxima à foz do Rio das Velhas e a expansão das áreas onde a temperatura varia de 26,1°C a 27,2°C da cidade de Corinto para áreas até o entorno de Curvelo. Já as faixas de temperaturas mais altas se expandiram de agosto a abril. As temperaturas mais altas, que variam de 28,5°C a 30,3°C expandiram-se sobretudo no baixo e médio baixo Velhas nas áreas próximas ao Rio das Velhas, assim como a faixa que abrange áreas onde a temperatura varia de 27,3°C a 28,4°C.

As temperaturas mínimas apresentaram mudanças visíveis nos meses mais frios do ano, junho e julho, quando áreas ao longo da borda sudoeste e noroeste da bacia que antes variavam entre 11,1 e 11,9°C passaram a atingir entre 12 e 12,8°C. Nos demais meses as áreas de menor temperatura não tiveram alterações significativas entre as normais e a série de 1991-2019. As faixas de maior temperatura mínima, que variam entre 15,6 e 16,4°C apresentaram expansão de outubro a março, sendo mais significativa no mês de outubro quando antes compreendia o baixo Velha até as proximidades de Corinto e parte do nordeste da bacia até Augusto de Lima, e passou a compreender áreas próximas a Curvelo, chegando à borda noroeste da bacia, e as áreas mais baixas do nordeste. Expansão semelhante a apresentou a segunda faixa térmica mais quente, que varia de 14,7 a 15,5°C, no mês de abril, quando também uma área ao norte do município de Belo Horizonte apresentou um aumento de até 0,9°C.

4.3 Considerações sobre os atributos climáticos na bacia hidrográfica do Rio das Velhas

- Á Não houve mudanças no padrão de distribuição espacial e temporal dos atributos meteorológicos entre a normal climatológica de 1961-1990 e a série de 1991-2019, embora tenha sido observado um aumento de 1,15% da precipitação máxima e queda de 3,3% da precipitação mínima na bacia na série mais recente, bem como um aumento dos valores de temperatura do ar, principalmente na baixa bacia.
- Á A variabilidade espacial da precipitação está fortemente correlacionada à rugosidade e altitude na alta bacia do Rio das Velhas e na borda leste, margeada pela Serra do Espinhaço, e à latitude em relação à redução da precipitação da nascente à foz do rio, que pressupõe o deslocamento de sistemas atmosféricos instáveis do sul para o norte da bacia.
- Á Os dados pluviométricos demonstraram que a bacia possui um perfil sazonal de precipitação bem estabelecido, típico dos climas tropicais, com o trimestre mais chuvoso (NDJ) sendo responsável por até 61% do total de chuvas anual, enquanto o trimestre seco (JJA) responde por menos de 5%.
- Á As variáveis meteorológicas relacionam-se com as características geológicas da superfície em nível local/sub-regional com a seguinte ordem de importância: altitude, rugosidade, latitude. A influência do uso da terra nos climas sub-regionais e locais não foi detectada a partir da base de dados meteorológicos utilizada, porém sabe-se que o uso da terra urbano pode influir em nível local e níveis inferiores sobre a temperatura do ar. Na bacia há a configuração de mesoclima urbano nas áreas conurbadas da RMBH, uma vez que Assis (2010) identificou mesoclima urbanos em belo Horizonte e sugeriu sua continuidade nas cidades fronteiriças.
- Á Se a foz do rio se encontra numa área quente e de déficit hídrico anual, com predomínio de uso da terra de agricultura e pastagem, usos que demandam mais recursos hídricos, e a nascente e as partes altas da bacia encontram-se em áreas de excedente hídrico, é importante atenção com a manutenção da demanda hídrica nessas áreas que são importantes para manutenção do volume hídrico na foz.

- Á Quanto à variabilidade interanual da precipitação, os desvios de chuva em relação aos anos normais ocorrem na estação chuvosa, mantendo-se a estação seca praticamente inalterada. Assim, nos anos secos a precipitação reduz de setembro a maio, sendo o auge o mês de janeiro que pode apresentar até um terço do esperado em um ano normal, e nos anos chuvosos ela eleva-se de outubro a março, chegando a dobrar no mês de janeiro em relação aos anos normais.
- Á Os mecanismos da sazonalidade das chuvas na bacia hidrográfica do Rio das Velhas perpassam pela variação mensal da insolação na bacia e, portanto, da energia que alimenta os sistemas atmosféricos. Já os mecanismos de variabilidade anual da precipitação apontam possíveis influência do ENOS e ODP, ainda que não muito evidentes. Assim, a complexidade do clima na região Sudeste do país, a qual está sujeita à atuação de quase todos os sistemas atmosféricos atuantes no Brasil, pressupõe que a variabilidade e oscilação da precipitação na bacia do Rio das Velhas está atrelada a um conjunto de mecanismos globais e zonais que vão além dos fenômenos de tele conexão ENOS/ODP.

5. UNIDADES CLIMÁTICAS

Neste capítulo é apresentada a síntese climática da área de estudo por meio de mapas das unidades do clima regional, sub-regional e local da bacia hidrográfica do Rio das Velhas. Também é discutida a hierarquia escalar do clima com foco nos atributos e controles climáticos na área de estudo.

5.1 Organização escalar do clima

No nível superior da hierarquia escalar organizam-se os fenômenos do macroclima que se propagam em escala global e associam-se à circulação primária da atmosfera (Figura 63). Neste nível, associam-se os fenômenos El Niño/La Niña e a configuração de fases positivas e negativas da Oscilação Decadal do Pacífico (ODP). Na bacia hidrográfica do Rio das Velhas esses fenômenos não geram sinais fortes sobre a precipitação, porém geram alguma influência sobre os anos extremos secos e chuvosos na bacia. No entanto, como a região Sudeste do país é submetida à alternância de sistemas atmosféricos de origem tropical e extratropical, a variabilidade interanual dos atributos meteorológicos na bacia do Velhas é de difícil previsibilidade, estando relacionada a mecanismos complexos que definem a variabilidade anual da atuação desses sistemas.

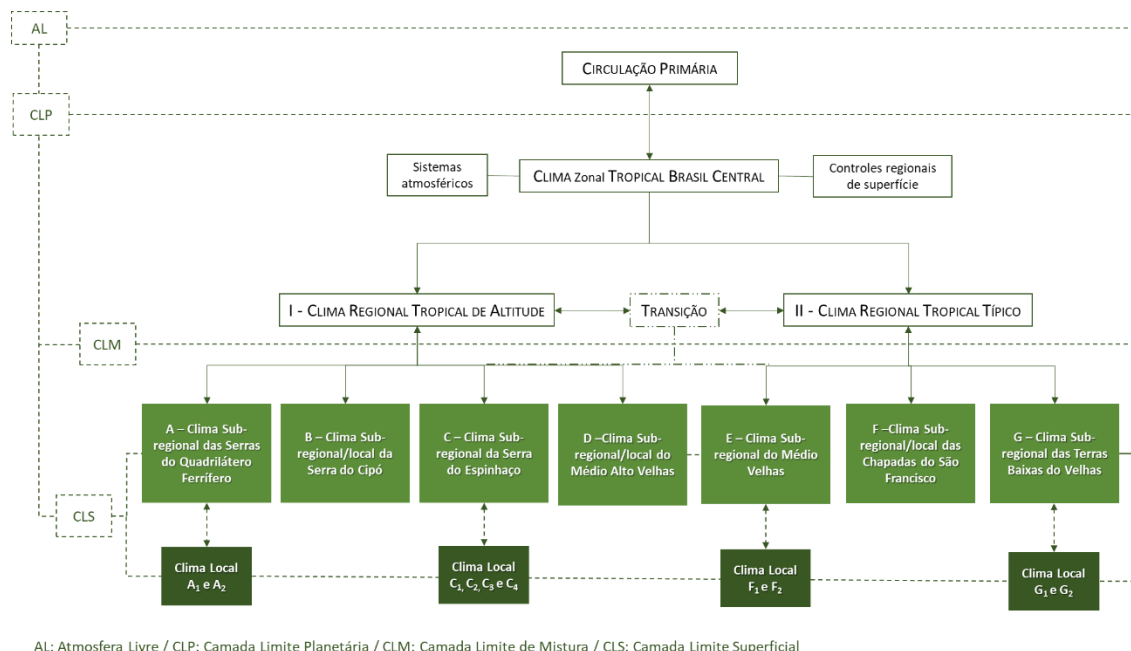


Figura 63: Organização escalar do clima na bacia hidrográfica do Rio das Velhas. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

No nível zonal, a bacia hidrográfica do Rio das Velhas encontra-se na área definida por IBGE (2002) como Tropical Brasil Central. Nela, predomina o perfil sazonal da precipitação e temperaturas médias anuais influenciadas pela variação mensal da

radiação solar que atinge a superfície entre os trópicos com intensidade máxima duas vezes ao ano. No entanto, dentro da zona tropical é possível observar diferenças térmicas e pluviométricas que justificam sua distinção em climas tropicais regionais. Neste trabalho foram identificados dois climas regionais na bacia hidrográfica do Rio das Velhas, sendo eles o Clima Tropical Típico e o Tropical de Altitude (Figura 64).

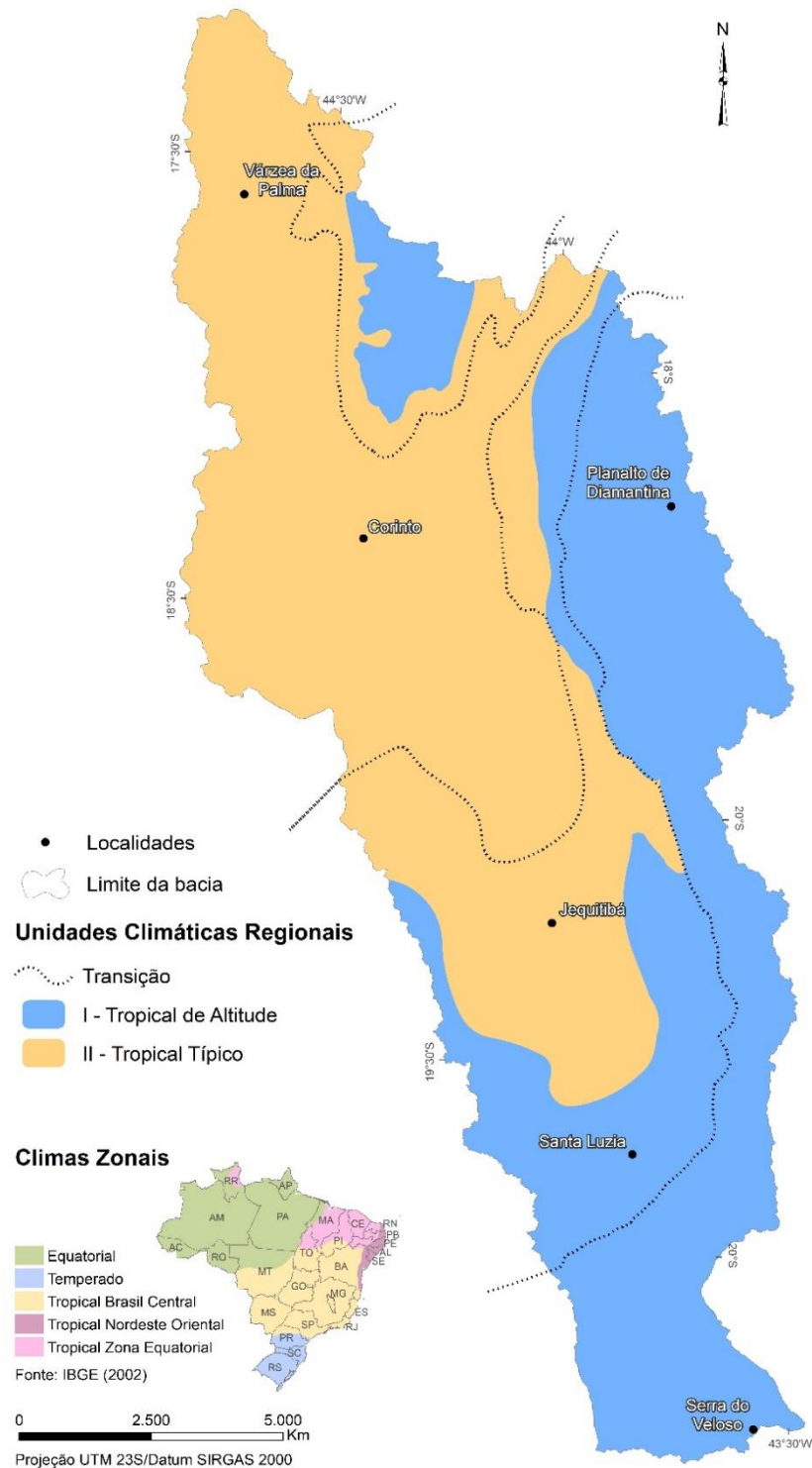


Figura 64: Unidades climáticas regionais da bacia hidrográfica do Rio das Velhas. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

Ambas as regiões são submetidas a controles climáticos dinâmicos que consistem em uma sucessão na atuação de sistemas sinóticos estáveis e instáveis ao longo do ano, com destaque para a ZCAS, ZCOU, FF e LI durante a primavera-verão, e do ASAS¹² e APAS no outono-inverno. A atuação alternada entre esses sistemas resulta na característica de sazonalidade pluviométrica típica dos climas tropicais em toda a bacia, com verão chuvoso e inverno seco. O que diferencia essas áreas é a altitude que, quando mais elevada, condiciona climas mais úmidos nos períodos chuvosos do ano e mais frios durante todo o ano que as áreas de Clima Tropical Típico. Isso ocorre devido ao efeito turbulento que as áreas elevadas e com topografia irregular provocam nas camadas atmosféricas contidas na Camada Limite Planetária (CLP) onde manifestam-se os fenômenos do clima zonal/regional, e ao efeito de arrefecimento adiabático que a rarefação do ar proporciona.

Observando-se pontos extremos da bacia fica clara essa diferenciação do clima regional. Em Várzea da Palma e Corinto o acumulado anual de precipitação é de 929,2mm e 1016,8mm respectivamente, com cinco meses secos no ano, enquanto na Serra do Veloso e no Planalto de Diamantina esses totais são até 60% mais altos (1544,7mm e 1335,6mm respectivamente) e os meses secos variam entre 3 e 4 (Figura 65). A temperatura média anual é superior a 20,0°C nas localidades inseridas no clima Tropical Típico, enquanto na Serra do Veloso e no Planalto de Diamantina ela não ultrapassa os 17,8°C. Interessante observar nos climogramas da figura 65 que, embora haja diferenças nos totais pluviométricos, o perfil sazonal é o mesmo para todas as localidades já que eles compartilham o mesmo clima zonal.

Assim, embora os mesmos sistemas atmosféricos atuem em todo o território da bacia, as características de altitude e rugosidade do relevo que secciona a bacia entre as terras altas e movimentadas do Quadrilátero Ferrífero e da Serra do Espinhaço e as terras baixas e suavemente onduladas a planas da depressão do Rio São Francisco, determinam a diferenciação do perfil térmico e pluviométrico que distinguem os climas regionais tropicais. Entre essas regiões há uma faixa onde transicionam as características de uma ou outra zona. Nela, localizam-se os municípios de Santa Luzia e Jequitibá, os quais apresentam totais pluviométricos e médias térmicas semelhantes, porém o primeiro com

¹² O ASAS atua na bacia durante todo o ano, porém destaca-se sua participação no inverno quando é o principal sistema atmosférico a garantir tempo estável e seco durante toda a estação, junto ao APAS.

excedente hídrico anual superior ao segundo e amplitude térmica anual menor, estando mais alinhado com o clima tropical de altitude (Figura 65).

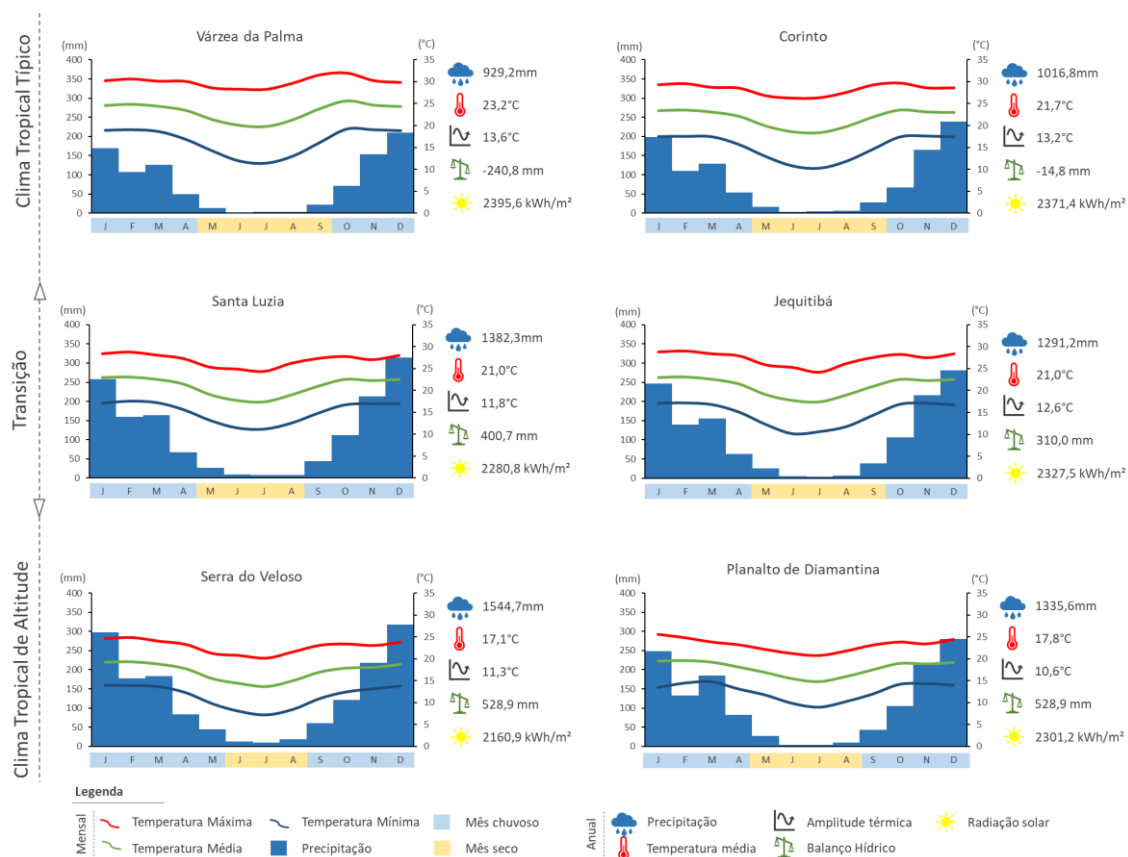


Figura 65: Dados meteorológicos de 1991 a 2019 em pontos dos climas regionais da bacia do Rio das Velhas. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

Nas regiões tropicais da bacia há diferenças significativas de composição geocológica que justificam sua divisão em climas sub-regionais associados às características da superfície que persistem no espaço por longas extensões da bacia (de 663 a 6,8mil km²) (Figura 66). Essas unidades, inseridas nos climas tropicais regionais, compartilham de suas características térmica e pluviométrica, porém são distinguidas pela combinação de diferentes altitude e latitude. Nestas unidades, assim como nos climas locais, as características da superfície influem sobre a Camada Limite Superficial (CLS) definindo o modo como a atmosfera local se aquece ou resfria, criando áreas de aceleração e desaceleração dos ventos, e influenciando localmente sobre os totais pluviométricos anuais.

Foram identificados na área de estudo sete unidades climáticas sub-regionais (Figura 66). Na região Tropical de Altitude individualizam-se os climas sub-regionais A (Clima das Serras do Quadrilátero Ferrífero) e B (Clima da Serra do Cipó). Embora apresentem atributos meteorológicos com valores médios muito próximos (Tabela 16), e ambos apresentem apenas três meses secos ao ano, há uma diferença importante no

modelado do relevo entre essas áreas que influi, principalmente, sobre a velocidade dos ventos e a amplitude pluviométrica nessas áreas. Enquanto no Quadrilátero Ferrífero há uma heterogeneidade expressiva das altitudes, a Serra do Cipó apresenta uma variação menor, e altitude média maior do que a primeira. Assim, a média pluviométrica no Clima A é maior do que no Clima B em função das altitudes máximas serem mais elevadas no primeiro concentrando precipitação nesses pontos que eleva a média de toda a sub-região.

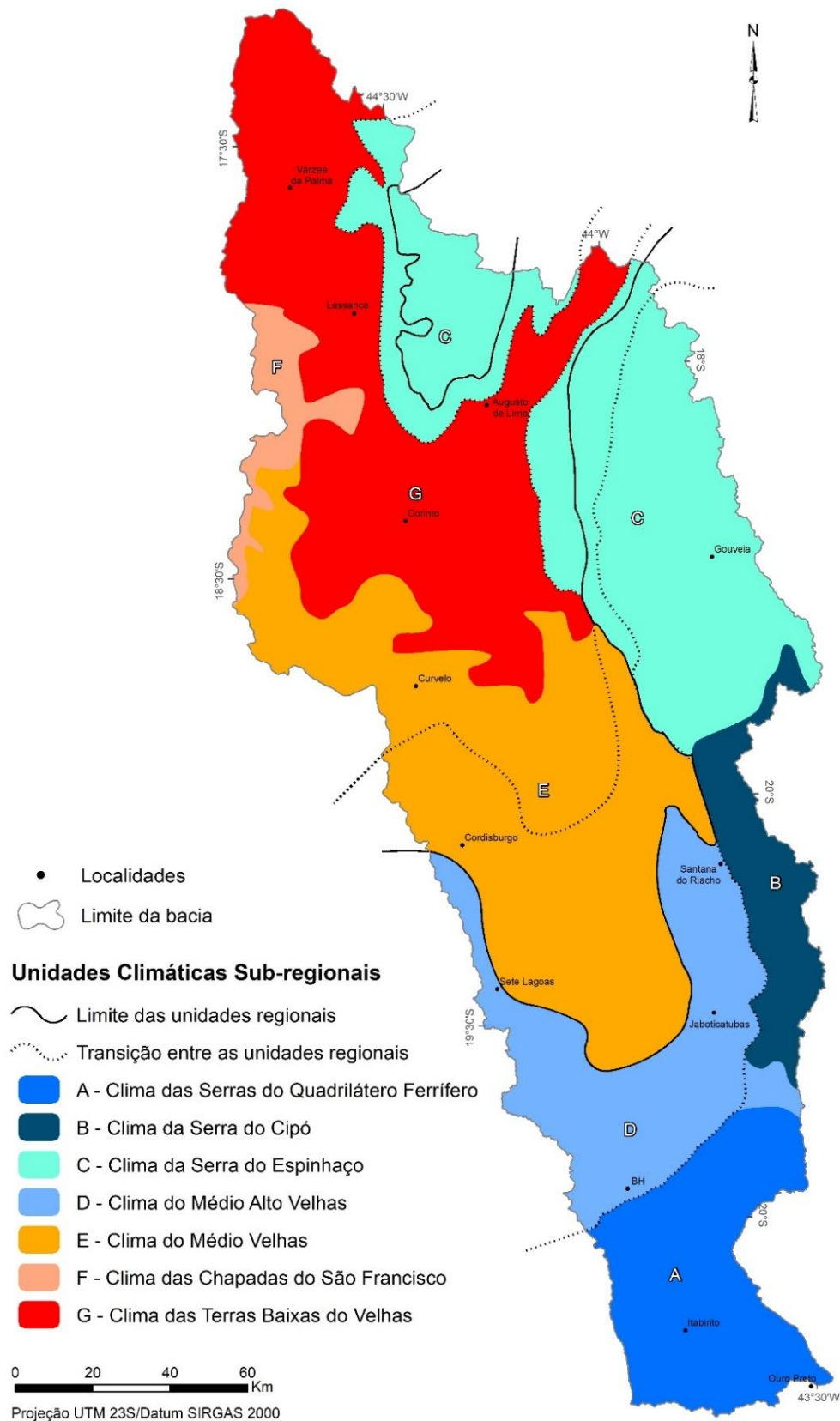


Figura 66: Unidades climáticas sub-regionais da bacia hidrográfica do Rio das Velhas. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

Tabela 16: Atributos meteorológicos médios* das unidades climáticas sub-regionais da bacia hidrográfica do Rio das Velhas

CLIMA SUB-REGIONAL	Precipitação média	Amplitude Pluviométrica na área	Temp. Média	Temp. Mínima	Temp. Máxima	Velocidade média dos Ventos	Balanco Hídrico Anual	Altitude média	Altitude Mínima	Altitude Máxima
A - Clima das Serras do Quadrilátero Ferrífero	1536,6	171,4	18,6	12,7	24,5	1,1	692,9	1078	692	1727
B - Clima da Serra do Cipó	1506,2	255,0	18,1	12,3	23,9	0,9	684,4	1192	667	1688
C - Clima da Serra do Espinhaço	1156,0	582,7	19,7	13,6	25,5	0,8	283,7	1033	501	1564
D - Clima do Médio Alto Velhas	1398,4	306,7	20,3	14,3	26,4	0,8	460,9	828	651	1264
E - Clima do Médio Velhas	1212,5	379,1	21,1	14,7	27,5	0,7	222,8	698	551	1280
F - Clima das Chapadas do São Francisco	1039,5	163,0	21,1	14,6	27,5	0,8	57,1	851	601	1003
G - Clima das Terras Baixas do Velhas	978,0	196,9	22,2	15,6	28,8	0,6	-104,0	598	453	1008

Elaboração: Lilian Machado, 2021.

*Valores médio calculados por estatística zonal tendo como zonas as unidades climáticas e como valores de cálculo os rasters das normais climatológicas provisória de 1991 a 2019. O raster de altitude do SRTM e o raster do Balanço Hídrico Climatológico anual (BHC) calculado com base na série de dados de 1991 a 2019.

A sub-região C - Clima da Serra do Espinhaço localiza-se numa área que, embora compartilhe características morfológicas, geológicas e de uso da terra com a sub-região B, apresenta precipitação média até 350mm inferior que a primeira e temperatura média 1,7°C mais elevada. Essa sub-região, localizada em latitudes mais baixas do que os climas A e B, quando atingida por sistemas atmosféricos instáveis migratórios como as FF, pode estar sujeita a menor precipitação acumulada nesses eventos em função da passagem dos mesmos pelas terras elevadas do Quadrilátero Ferrífero e Serra do Cipó, onde a umidade é primeiramente distribuída. Além disso, a Serra do Cipó consiste em um divisor de águas da bacia que se encontra quase por completo no Velhas, enquanto a região aqui denominada Clima da Serra do Espinhaço tem uma área elevada a leste da bacia do Velhas inserida na bacia do Rio Jequitinhonha com uma extensão de cerca de 50km (Figura 67). Essa área recebe primeiro a circulação de leste despejando aí a umidade provinda do oceano, enquanto o Cipó é uma barreira única a esses ventos. Já a temperatura média mais elevada, relaciona-se, primeiramente, com a altitude mais baixa dessa sub-região em relação aos climas A e B, à localização em latitudes mais baixas.

A unidade D – Clima do Médio Alto Velhas está localizada numa área de Clima Tropical de Altitude, porém em uma região de transição para os Clima Tropicais Típicos. A precipitação média é de 1398,4mm e a temperatura média é de 20,3°C. Nessa região, embora o excedente hídrico anual seja cerca de 33% menor do que nos climas A e B, ele é ainda alto, uma média de 460,9mm excedentes anuais. Esse valor cai para menos da metade (222,8mm) na unidade E – Clima do Médio Velhas. Nesta, o relevo mais baixo e menos rugoso do que da unidade A, B e D geram o efeito de queda na precipitação, e aumento das temperaturas que, aí, superam a média de 21,0°C. Apesar disso, o BHC anual é positivo em toda a extensão da unidade, diferente da unidade G – Clima das Terras Baixas do Velhas. Esta possui praticamente todo o território em área de déficit hídrico anual, que pode chegar a -241,0mm anuais próximo à foz.

Na unidade G a combinação entre as altitudes mais baixas da bacia, junto a latitudes baixas que favorecem a insolação, e a distância da alta bacia, onde os sistemas instáveis migratórios depositam boa parte da umidade que carregam, resulta numa sub-região quente, com média térmica de 22,2°C, máxima de 28,8°C, e seca em relação às áreas altas, com média pluviométrica de 978mm, cerca de 35% menor do que nos climas O baixo Velhas seria, em função da latitude e relevo, uma área deficitária por completo se não fosse a existência de duas proeminências do relevo que configuram áreas de maior

precipitação e excedente hídrico na região. Essas áreas são a Serra do Cabral, que integra o clima C, e a Serra do Repartimento, a qual consiste na unidade F – Chapadas do São Francisco.

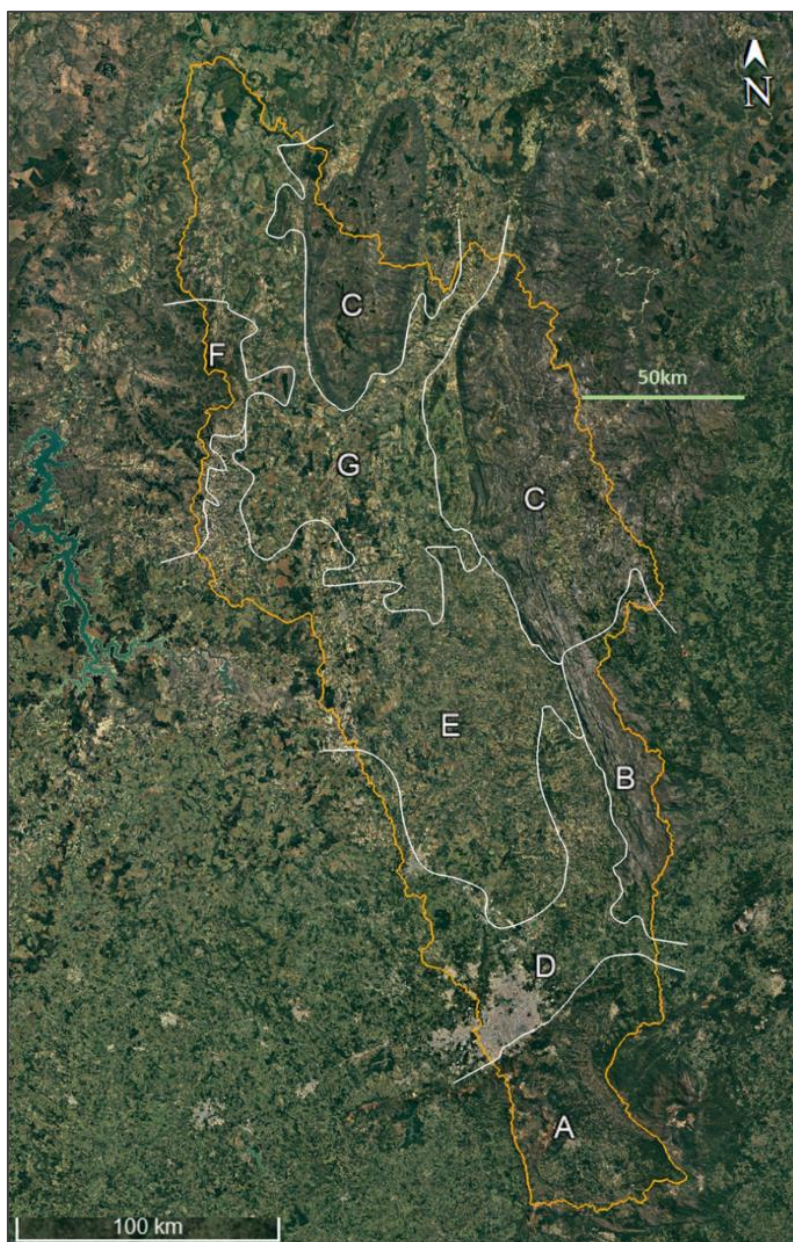


Figura 67: Área elevada a oeste da unidade climática sub-regional C - Clima da Serra do Espinhaço. Imagem Google Earth.

Essa unidade apresenta uma elevação de altitude de cerca de 250m em relação à unidade G, o que influi não apenas em precipitação mais elevada em cerca de 10%, temperatura média 1,0°C mais baixa (21,1°C) e um BHC anual positivo, na média de 57,1mm. Ainda que a precipitação e o excedente hídrico sejam baixos em comparação com climas da alta e média bacia, a região da unidade F consiste em cabeceira para importantes cursos d'água que banham a região, como o Rio Bicudo, e tributários diretos

do Velhas, portanto ainda que pequeno, o excedente hídrico nessa região é importante para a manutenção desses afluentes do baixa Velhas e da região

É importante lembrar que, as unidades A, B, C e F, embora tenham como características superfícies mais elevadas que as adjacentes, o que condiciona totais pluviométricos mais elevados nesses locais do que os arredores, não alteram o perfil sazonal tropical dessas áreas, mantendo-se invernos secos e frios e verões quentes e chuvosos (Figuras 68 e 69). Assim, nos meses mais chuvosos (NDJ), a bacia está sob influência de sistemas instáveis migratórios e da convecção induzida pelas altas temperaturas que são resultado da intensidade da radiação solar que atinge a superfície nesta época do ano. A precipitação acumulada nesses meses é elevada em toda a bacia, porém o efeito de turbulência que as áreas elevadas do Quadrilátero Ferrífero e da Serra do Espinhaço resulta em totais acima dos 700mm em localidades como Ouro Preto, Belo Horizonte, Gouveia e Santana do Riacho, enquanto em áreas planas e rebaixadas como Curvelo e Várzea da Palma os totais ficam entre 500mm e 650mm (Figura 68). O efeito da rarefação do ar sobre áreas de maior altitude também fica evidente nos meses de verão, quando as áreas mais elevadas apresentam até 5,6°C mais baixas do que nas áreas rebaixadas.

Já nos meses de inverno, a predominância dos movimentos subsidentes do ar devido à atuação do ASAS e do APAS provoca uma queda generalizada nos totais pluviométricos. Na região próxima à foz da bacia, em Várzea da Palma, o acumulado é de apenas 5,4mm. O efeito da altitude e rugosidade sobre a precipitação nesses meses é irrisório, uma vez que nas localidades do Quadrilátero e do Espinhaço o acumulado é ligeiramente maior, variando entre 12,6mm na Serra do Cabral e 50mm em Ouro Preto, resultando em déficit hídrico em toda a extensão da bacia. Nos meses mais secos a altitude tem uma importância maior sobre as temperaturas médias. A diferença entre Ouro Preto e Várzea da Palma é de 9,0°C. Entre essas localidades a latitude também tem efeito sobre as temperaturas média, uma vez que o ângulo de incidência da radiação solar na foz do rio principal é maior do que na nascente (Figura 69).

SITUAÇÃO PREDOMINANTE DE VERÃO

Participação de Sistemas Instáveis Migratórios e Convecção de Verão

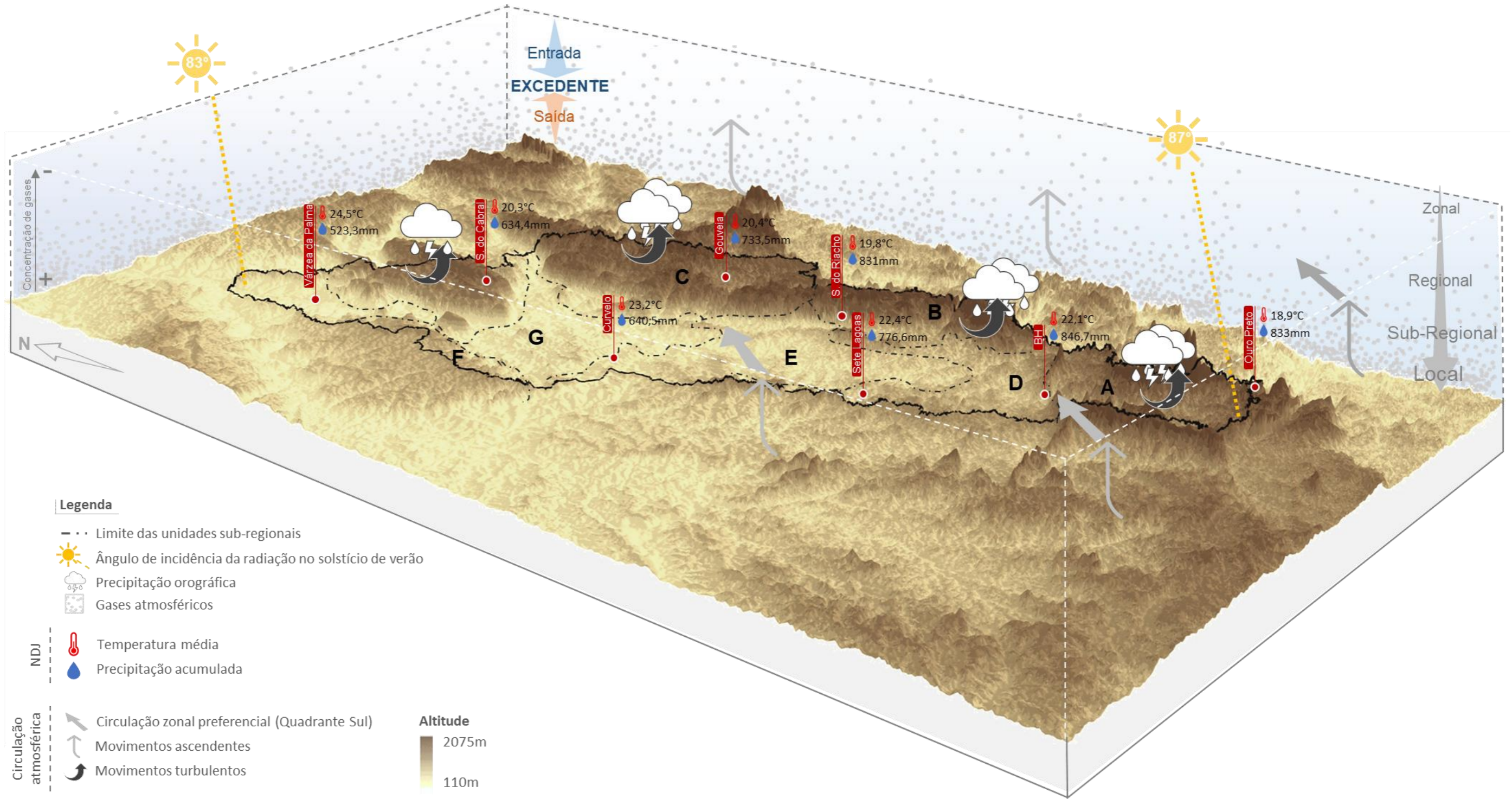


Figura 68: Atributos e controles climáticos sub-regionais na bacia do Rio das Velhas - Situação de verão. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

SITUAÇÃO PREDOMINANTE DE INVERNO
 Predominância do ASAS e participação do APAS

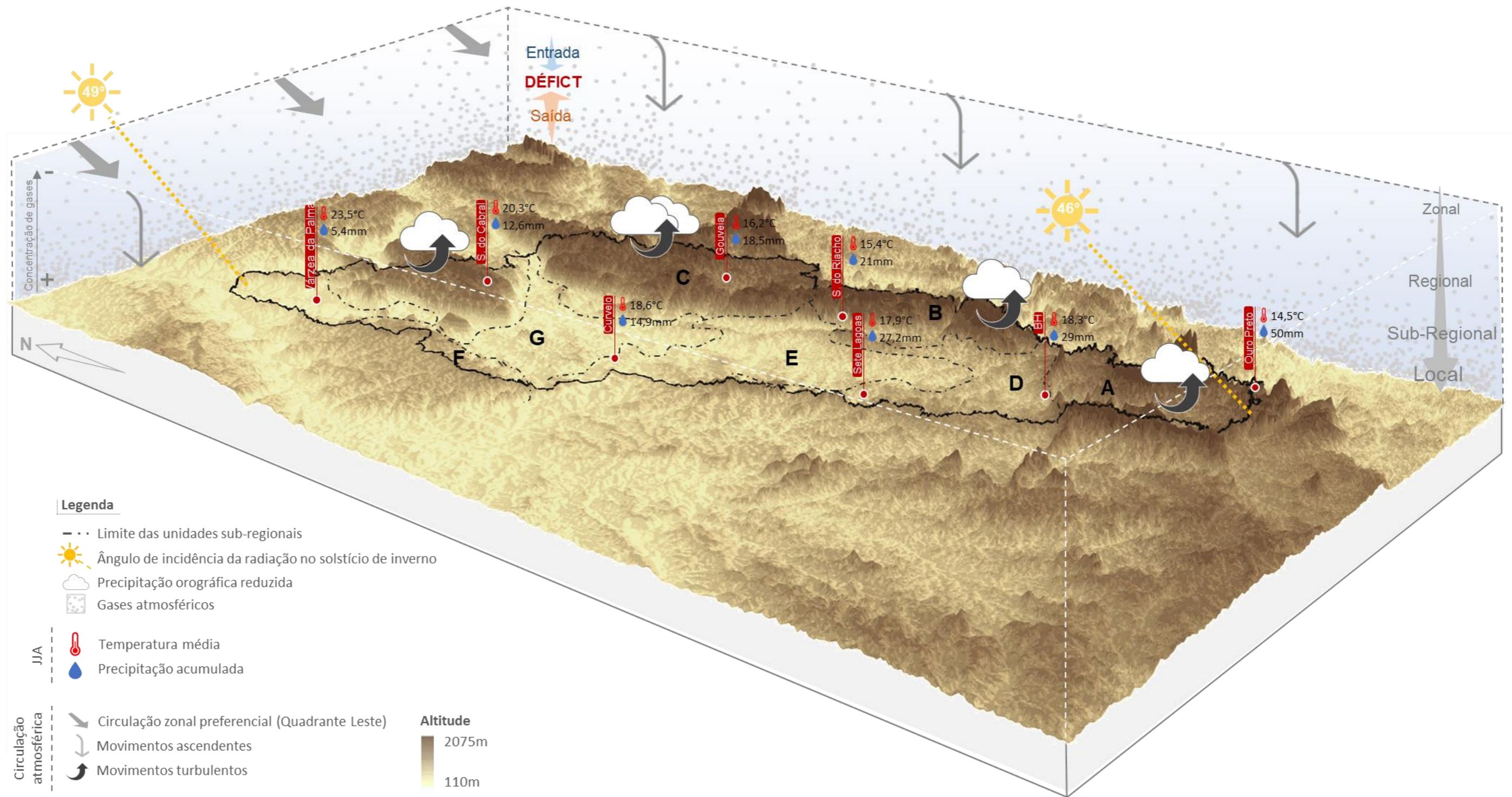


Figura 69: Atributos e controles climáticos sub-regionais na bacia do Rio das Velhas - Situação de Inverno. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

5.2 Unidades Climáticas Locais

Foram identificadas na bacia hidrográfica do Rio das Velhas 10 unidades climáticas locais associadas às unidades sub-regionais descritas no tópico anterior (Figuras 70 e 71). Nessas unidades a influência das características da superfície dentro das unidades sub-regionais sobre a atmosfera é diferenciada por mudanças de altitude locais na camada limite superficial. Nas unidades sub-regionais B, D e F não foi possível identificar climas sub-regionais a partir dos dados utilizados nessa pesquisa.

Os climas locais A1 e A2 estão localizados no Quadrilátero Ferrífero, porém o primeiro nos Patamares Elevados e o segundo nos Patamares Rebaixados da região. A área abrangida pelo clima A1 compreende altitudes acima dos 1000 metros na maior parte de sua extensão, enquanto na área do clima A2 a altitude varia entre 751 e 1050 metros. Essa diferença provoca uma redução da precipitação na unidade A2 em relação a A1 da ordem de 100mm, o que não é fundamental para a diferenciação climática entre essas áreas, uma vez que o excedente hídrico permanece superior a 500mm em ambas assim como a configuração de 3 meses secos e uma média de 5 meses de déficit hídrico no ano, entre abril e setembro (Figura 72). A média zonal da precipitação entre essas áreas, inclusive, difere-se em menos de 100mm (Figura 72). No entanto, a altitude distinta entre as unidades influi sobre uma diferença de temperatura média significativa. Enquanto na unidade A1 as temperaturas médias variam de 16,1°C a 18,1°C, na unidade A2 a temperatura vai de 18,2°C a 20,2°C (Figura 71), com uma diferença das temperaturas média, mínima e máxima de 1°C (Figura 72).

As unidades locais associadas ao Clima Sub-regional da Serra do Espinhaço estão submetidas a características locais da superfície que se diferenciam não apenas pela altitude, mas também pelo modelado do relevo. A unidade C1 – Clima do Planalto de Diamantina possui altitudes mais elevadas do que as demais unidades do clima Sub-regional C, uma média de 1162,9m. No entanto, é também a unidade onde ocorre a maior variação de altitude (1051m a 1564m). Em função desse desnível a temperatura média pode variar até 2,0°C (17,2°C a 19,2°C). Essa é também a unidade mais chuvosa dos climas locais submetidos à unidade sub-regional C, com precipitação variando entre 1311mm e 1420mm, 4 meses secos no ano e excedente hídrico anual médio de 637,7mm (Figura 72). Essa é uma influência adicional do modelado do relevo nesta unidade que favorece a turbulência do ar, uma vez que ela é marcada pela divisão fortemente escarpada a oeste e uma superfície ondulada a fortemente ondulada em toda a sua extensão.

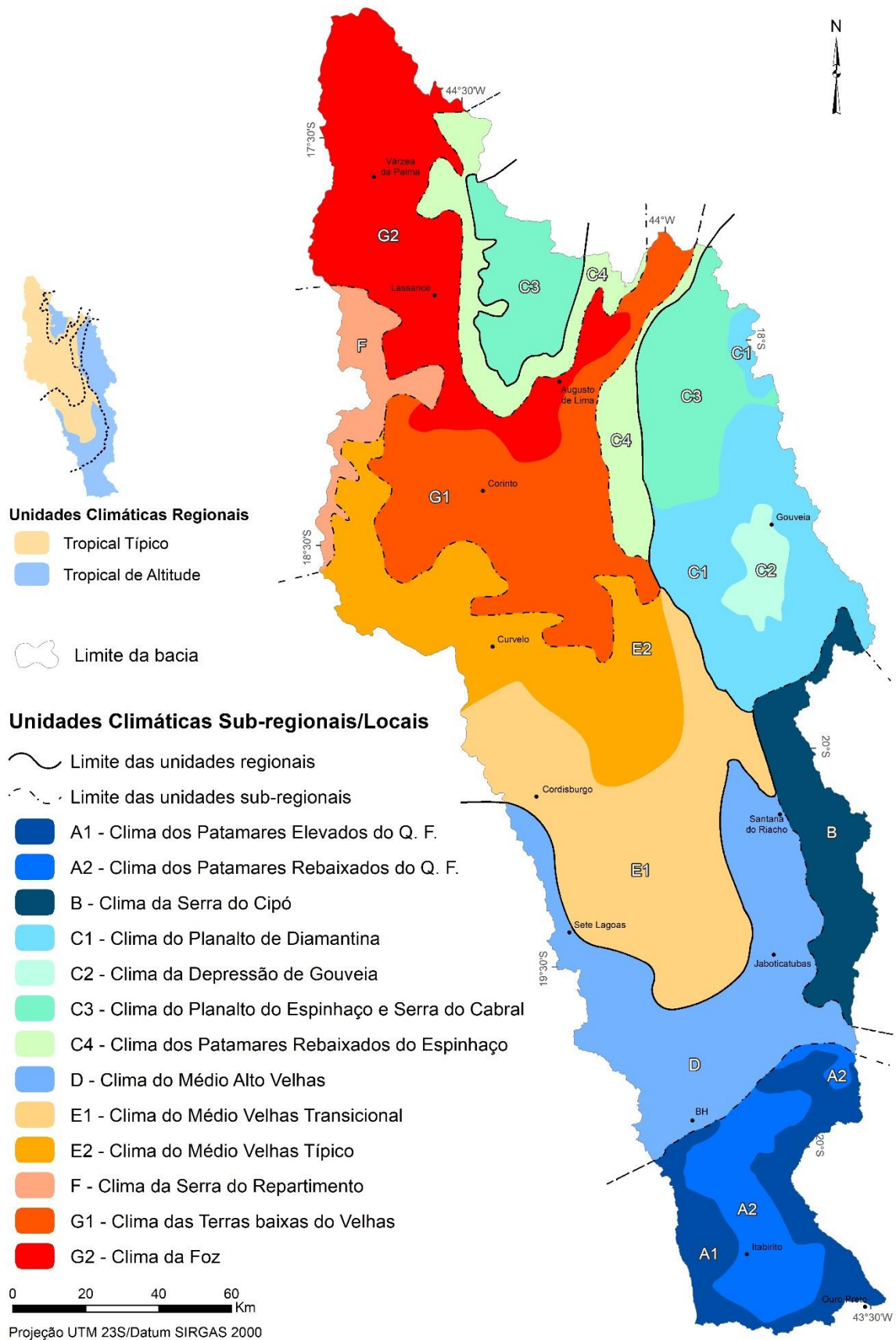


Figura 70: Unidades climáticas sub-regionais/locais da bacia hidrográfica do Rio das Velhas. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

Unidades Climáticas									
Zonal	Regional	Sub-regional		Local		Classificação	Característica da superfície		
Tropical Brasil Central	I - Tropical de Altitude	A - Clima das Serras do Quadrilátero Ferrífero		A1 - Clima dos Patamares Elevados do Quadrilátero Ferrífero		A,fg,Exc _{3,4} ,S ₃ ,Ws ₁	alt ^{1,2,3} ,fo,1,3,4,6		
		B - Clima da Serra do Cipó		A2 - Clima dos Patamares Rebaixados do Quadrilátero Ferrífero		B,de,Exc ₃ ,S ₃ ,Ws ₂	alt ^{4,5} ,fo,1,2,4		
		C - Clima da Serra do Espinhaço		B - Clima da Serra do Cipó		AB,fg,Exc _{3,4} ,S ₃ ,Ws ₂	alt ^{1,2} ,esfo,2,3,7		
				C1 - Clima do Planalto de Diamantina		C,e,f,Exc ₃ ,S ₄ ,Ws _{2,3}	alt ^{1,2,3} ,onfo,2,3,7		
				C2 - Clima da Depressão de Gouveia		CD,e,Exc ₂ ,S ₄ ,Ws ₃	alt ^{4,5} ,on,4		
	II - Tropical Típico	D - Clima do Médio Alto Velhas		C3 - Clima do Planalto do Espinhaço e Serra do Cabral		DE,de,Exc _{1,2} ,S _{4,5} ,Ws _{2,3}	alt ^{2,3} ,onfo,2,3,7,8		
		E - Clima do Médio Velhas		C4 - Clima dos Patamares Rebaixados do Espinhaço		FG,b,DEF ₁ ,S ₅ ,Ws ₄	alt ^{4,5,6} ,onfo,2,4		
		F - Clima das Chapadas do São Francisco		D - Clima do Médio Alto Velhas		BC,c,Exc ₂ ,S ₄ ,Ws _{1,2}	alt ⁵ ,onfo,2,4,5		
		G - Clima das Terras Baixas do Velhas		E1 - Clima do Médio Velhas Transicional		D,c,Exc ₂ ,S ₅ ,Ws _{3,4}	alt ⁶ ,onso,2,4		
				E2 - Clima do Médio Velhas Típico		E,b,Exc ₁ ,S ₅ ,Ws ₄	alt ⁶ ,onso,2,4,8		
		F - Clima das Chapadas do São Francisco		F,c,Exc ₁ ,S ₅ ,Ws ₃	alt ^{4,5} ,onso,2,4,8				
		G1 - Clima das Terras Baixas do Velhas		FG,b,DEF _{1,2} ,S ₅ ,Ws ₄	alt ^{6,7} ,so,2,4,8				
		G2 - Clima da Foz		G,a,DEF ₃ ,S _{5,6} ,Ws ₄	alt ⁷ ,sopl,2,4,8				

CHAVE DE CLASSIFICAÇÃO									
Perfil térmico e pluviométrico									
Precipitação acumulada anual (mm)		Temperatura média anual (°C)		Balanço Hídrico Climatológico anual (mm)		Meses secos		Velocidade dos vent	
A	1531 - 1640	a	22,3 - 23,3	Exc ₄	751 → 895	S ₃	3	Ws ₁	1,2 - 1,3
B	1421 - 1530	b	21,3 - 22,2	Exc ₃	501 → 750	S ₄	4	Ws ₂	1 - 1,1
C	1311 - 1420	c	20,3 - 21,2	Exc ₂	251 → 500	S _{5,4}	4 - 5	Ws ₃	0,8 - 0,9
D	1201 - 1310	d	19,3 - 20,2	Exc ₁	0 → 250	S ₅	5	Ws ₄	0,5 - 0,7
E	1091 - 1200	e	18,2 - 19,2	Def ₁	-79 → -1	S _{5,6}	5 - 6		
F	981 - 1090	f	17,2 - 18,1	Def ₂	-159 → -80				
G	870 - 980	g	16,1 - 17,1	Def ₃	-240 → -160				

Características da superfície				
Altitude	Rugosidade	Uso e ocupação da terra (2019)		
alt ¹	1351 - 1836	pl	Plano	1: Formação Florestal
alt ²	1201 - 1350	so	Suavemente ondulada	2: Formação Savânica
alt ³	1051 - 1200	on	Ondulado	3: Formação campestre
alt ⁴	901 - 1050	fo	Fortemente ondulada	4: Agricultura/Pastagem
alt ⁵	751 - 900	es	Escarpado	5: Infraestrutura Urbana
alt ⁶	601 - 750			6: Mineração
alt ⁷	453 - 600			7: Afloramento Rochoso
				8: Eucalipto e Pinus

Figura 71: Características das unidades climáticas locais da bacia hidrográfica do Rio das Velhas. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

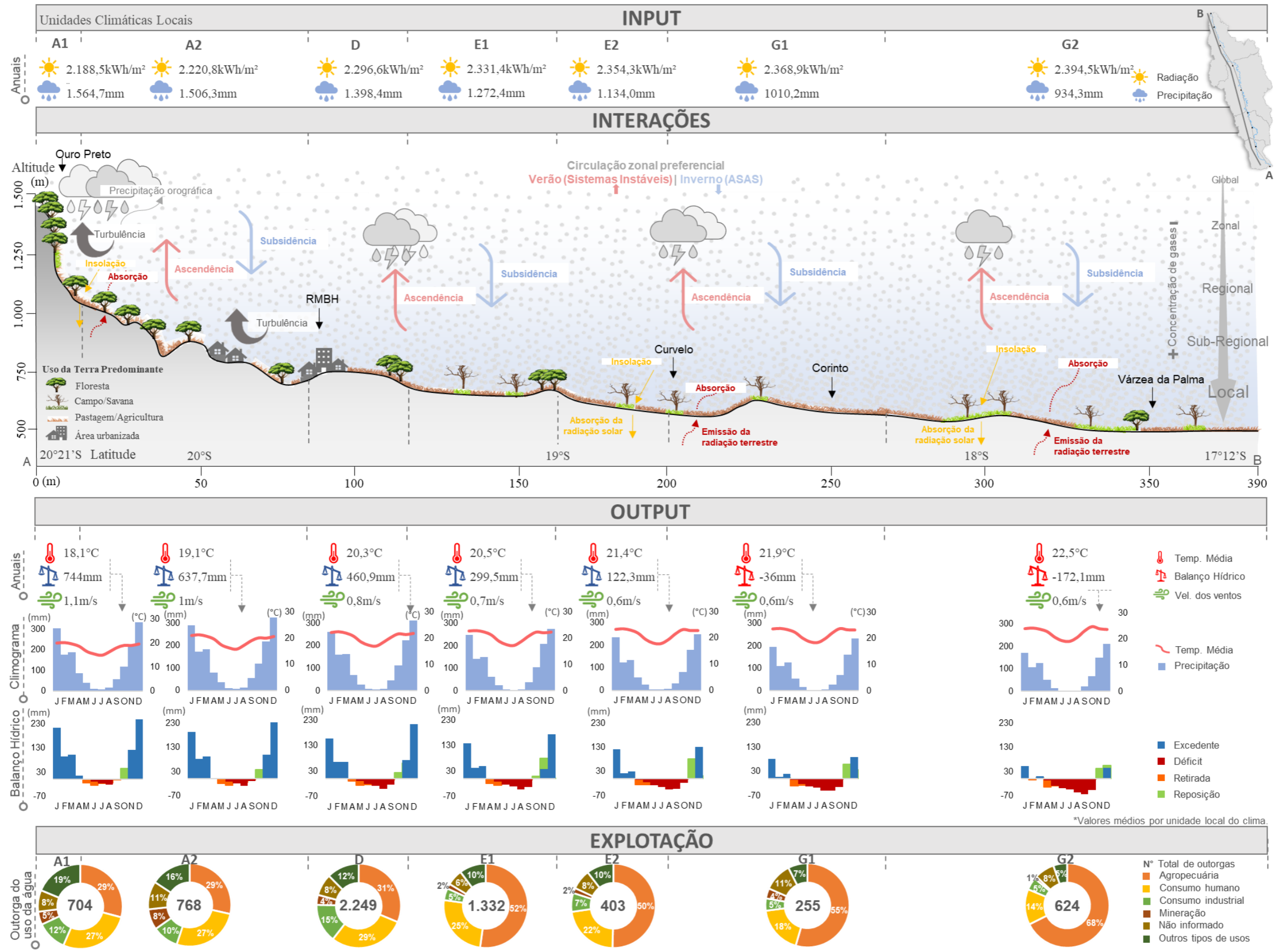


Figura 72: Atributos e controles climáticos locais na bacia do Rio das Velhas - Perfil A-B. Elaboração: Lilian Machado, 2021.

A unidade C2 – Depressão de Gouveia caracteriza-se por um rebaixamento estrutural do relevo inserido na unidade C1. Nesta unidade a altitude varia entre 751m e 1050m, com uma média de altitude de cerca de 140m inferior a unidade C1. A redução das altitudes se dá de forma gradual, compondo-se uma superfície de característica ondulada, sem grandes diferenças abruptas na altitude. Dessa forma, a temperatura média do ar nessa unidade varia menos do que na C1 ficando entre 18,2°C e 19,2°C. Apesar da diferença de altitude, a precipitação média nesta unidade é semelhante a C1, em função dessa estar confinada na primeira, sofrendo a influência da passagem dos sistemas atmosféricos que atuam na primeira. Apesar disso o excedente hídrico nessa unidade varia de 215mm a 500mm, até 250 mm menor do que na unidade C1. Como esta área está confinada na primeira, em altitudes rebaixadas, a velocidade dos ventos é menor em até 0,2m/s (Figura 73).

A unidade C3 – Clima do Planalto do Espinhaço e Serra do Cabral consiste em uma área de altitude semelhante a unidade C2, porém com menor variação de altitude. Nesta unidade a superfície varia entre 1050m e 1200m, com relevo ondulado a fortemente ondulado. Nesta unidade a precipitação é em média de 200mm a 220mm inferior do que nas unidades C1 e C2, porém nessa caso a altitude não é o único fator envolvido nos totais pluviométricos reduzidos dessa unidade, mas sua localização tanto latitudinal, onde sofre menor influência de sistemas úmidos transientes, e longitudinal já que a oeste dessa unidade, fora dos domínios da bacia hidrográfica do Rio das Velhas, há uma extensa área elevada sobre a qual a precipitação, influenciada pela circulação de leste, se deposita primeiramente (Figura 67). A área está em uma transição entre locais que possuem 4 ou 5 meses secos no ano. Aí também, a latitude em conjunto com a altitude condiciona temperaturas médias cerca de 1,0°C maiores do que nas unidades anteriores, variando entre 21,3°C e 22,2°C.

Na unidade C3 destaca-se um fator importante que é a presença da Serra do Cabral, com um desnível de mais de 500m de altitude, inserida na área de relevo mais baixo e plano da bacia, próximo à foz do Rio das Velhas. Essa proeminência em uma área de contexto de alta incidência de radiação solar anual, alta temperatura média do ar em relação ao restante da bacia, baixa precipitação e balanço hídrico anual deficitário, gera um clima local úmido e de excedente hídrico anual importante para a manutenção de afluentes do baixo Rio das Velhas, como o Rio Curimataí, e afluentes de contribuição direta.

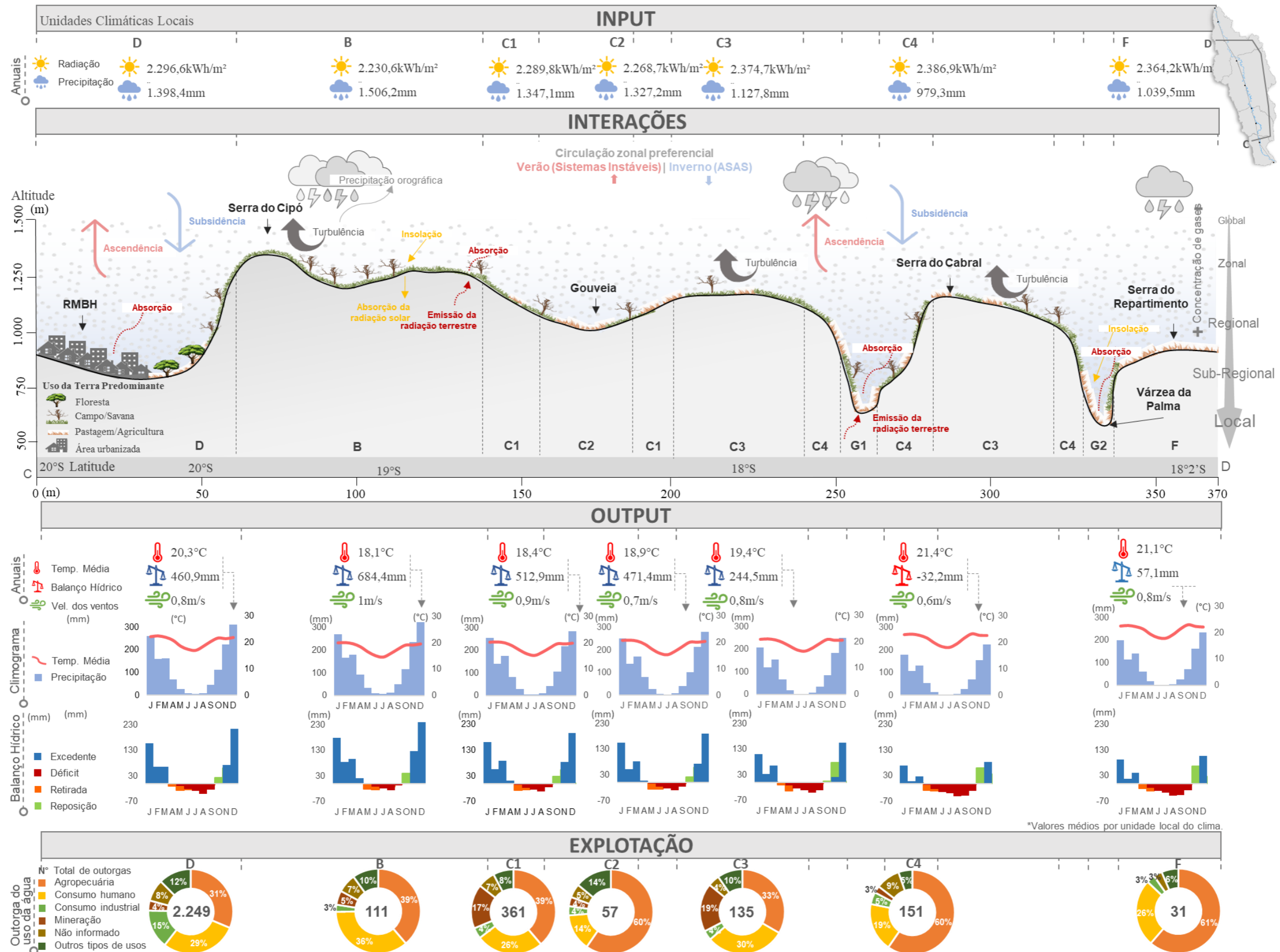


Figura 73: Atributos e controles climáticos locais na bacia do Rio das Velhas - Perfil C-D. Elaboração: Lilian Machado, 2021

A unidade C4 – Clima dos Patamares Rebaixados do Espinhaço consiste em um clima de transição entre as áreas elevadas da serra do Espinhaço e as áreas mais rebaixadas e planas da bacia, localizadas na depressão do Rio São Francisco. A altitude média nessa unidade pode ser até cerca de 400m menor do que nas demais unidades. A precipitação reflete essa redução do relevo, embora a superfície seja ondulada a fortemente ondulada. A temperatura média é de 1,0°C mais alta do que na unidade C3, variando de 21,3°C a 22,2°C (Figura 73). Diferente das demais unidades submetidas ao clima C, o balanço hídrico anual é deficitário em uma média de -32,2mm anuais, sendo uma área de transição entre as regiões de excedente e déficit hídrico na bacia, compreendendo 5 meses secos no ano.

A unidade sub-regional E compreende dois climas locais. A unidade E1 – Clima do Médio Velhas Transicional compreende uma área de transição entre o clima tropical de altitude e o clima tropical típico, enquanto a unidade E2 – Clima do Médio Velhas Típico está inteiramente inserido nesse último. Dessa forma, o clima E1 apresenta totais pluviométricos entre 1311mm e 1420mm anuais e excedente hídrico anual entre 251 e 500mm anuais. Apesar disso, essa região compreende 5 meses secos no ano e 6 meses de déficit hídrico (Figura 73). A altitude e o modelado do relevo são semelhantes entre as unidades E1 e E2, embora na unidade E1 a altitude decaia gradualmente em seus limites com a unidade D, tornando o relevo mais ondulado do que na unidade E2. Assim, a temperatura média dessas unidades difere em cerca de 1,0°C (Figura 72). Enquanto na primeira o atributo varia entre 20,3°C e 21,2°C, na segunda varia entre 21,3°C e 22,2°C. A unidade E2 apresenta totais pluviométricos em uma média de cerca de 140mm a menos do que a primeira e excedente hídrico médio cerca de 180mm menor, variando entre zero e 250mm ao ano, efeito da perda de umidade gradual que os sistemas atmosféricos úmidos migratórios sofrem ao passarem pelo Quadrilátero e se movimentarem em direção ao baixo velhas. Além disso, nesta unidade se configuram 7 meses de déficit hídrico no ano.

No baixo Velhas há a configuração de duas unidades climáticas: G1 – Clima das Terras Baixas do Velhas e G2 – Clima da Foz. Essas unidades são marcadas pela baixa precipitação em comparação com as demais áreas da bacia e a deficiência hídrica anual (Figura 72). A unidade G1 encontra-se em terreno suavemente ondulado a plano, em altitudes que variam de 453m a 750m, com uma média de 611 metros de altitude. Já a unidade G2 encontra-se em terrenos planos, em uma altitude média de 585 metros. Dessa forma, a temperatura do ar média é maior na unidade G2 em relação a G1, assim como as características pluviométricas são mais extremas, chegando a um déficit hídrico anual de até 240mm e 5 a 6 meses secos no ano.

Importante destacar que as unidades locais do clima sub-regional G-Terras Baixas do Velhas estão circundadas por dois anteparos orográficos importantes: a Serra do Repartimento a oeste, cuja extensão compreende o clima sub-regional F, e a Serra do Cabral a leste, a qual insere-se no clima sub-regional C (Figura 73). Das áreas que compreendem as unidades C e F partem afluentes importantes que banham os climas locais da unidade G, como o Rio Bicudo e o Rio Curimataí, assim como importantes cursos d'água de contribuição direta. A região do clima G compreende atividades agropecuárias que dependem da irrigação provinda desses cursos d'água. Nessas unidades o efeito da latitude sobre as temperaturas é visível, uma vez que a presença da Serra do Cabral e da Serra do Repartimento nos arredores demonstra uma queda da temperatura média do ar, enquanto nessa área rebaixada a temperatura pode variar entre 21,3°C e 22,2°C, no clima G1, e 22,3°C e 23,3°C, no clima G2.

Embora o uso da água não seja a única forma de exploração de recursos advindos do padrão climático de um local, utiliza-se aqui a análise desse recurso através das outorgas de uso da água na bacia hidrográfica do Rio das Velhas uma vez que essa está intrinsecamente relacionada ao uso e ocupação da terra e é afetada pelo balanço hídrico mensal. Assim, nas unidades A1 e A2 e D predominam os usos para agropecuária e consumo humano, com aproximadamente 30% das outorgas para cada tipo de uso, seguidos por outros usos humanos¹³ nas unidades A1 e A2, e pelo uso industrial na unidade D, a qual abrange a maior parte da RMBH, o que justifica a destinação para este tipo uma vez que se concentra aí as principais atividades industriais da bacia. Nessas unidades, o excedente hídrico anual favorece a captação, que ocorre entre 39% e 51% de maneira superficial (Tabela 17). Ainda assim, no período seco a redução da vazão dos cursos d'água nessa região gera alertas que preocupam gestores, já que a demanda cresce continuamente à medida em que se expande a RMBH (MARIANO, 2019). De acordo com o secretário do CBH-Velhas, Prof. Marcus Polignano, “As chuvas têm nos mostrado que só chover não resolve o problema. Mesmo com o volume de água considerável de 2020, ainda houve falta de água na bacia. O que demonstra a perda de capacidade da bacia de se recuperar” (CBH-VELHAS, 2021).

As regiões inseridas nas unidades climáticas sub-regionais A e D, vivem, atualmente, uma insegurança hídrica preocupante, que coloca em risco o abastecimento público da RMBH e a própria qualidade ambiental dos cursos d'água que sofrem pressão pelo aumento constante da demanda, a descarga de efluentes, a falta de proteção dos mananciais e a insegurança gerada

¹³ Esta categoria inclui: lavagem de veículos, aspersão de vias, paisagismo, desassoreamento, controle de cheias, transposição de cursos d'água e urbanização.

pelo desastre de Brumadinho. Esta última, além de levantar a preocupação sobre a segurança de barragens no alto Velhas, que põem em xeque a própria existência do rio, ainda pressiona o sistema de abastecimento. Na Bela Fama, local onde é feita a captação superficial de água para consumo humano na RMBH, a vazão média do rio é de cerca de 9m³/s nos períodos mais secos (RODRIGUES E SILVA, 2019). Segundo Polignano, após a captação o rio permanece com uma vazão de 3,08m³/s em maio de 2021 (CBH-VELHAS, 2021).

Tabela 17: Tipo de captação de água por outorgas

Y #	#	
	O	o
A1	49%	51%
A2	49%	51%
B	38%	62%
C1	35%	65%
C2	39%	61%
C3	32%	68%
C4	29%	71%
D	61%	39%
E1	50%	50%
E2	53%	47%
F	35%	65%
G1	45%	55%
G2	43%	57%

Fonte: Adaptado de IGAM (2021).

Das unidades B, C1 a C4, partem dois afluentes importantes do Rio das Velhas: o Rio Cipó e o Rio Paraúna, ambos referência em qualidade das águas, uma vez que essas regiões são menos afetadas por atividades humanas. A presença das unidades de conservação do Parque Nacional da Serra do Cipó (PNSC) e da APA Morro da Pedreira também contribui para preservação dos mananciais do Rio Cipó, que é o maior e mais importante contribuinte do Rio das Velhas. Apesar disso, a região sofre com pressões da agropecuária e da mineração. Apesar do número absoluto de outorgas ser menor do que nas unidades A e D, ele chega a ser até 60% destinado ao uso da agropecuária que é, reconhecidamente, um dos setores que mais demanda o recurso para manutenção de suas atividades, e 5% e 19% destinado a mineração. Com exceção da unidade C4, as demais apresentam balanço hídrico anual positivo que vai de 244,5mm (unidade C3) até 684,4mm (unidade B), o que favorece a manutenção do volume de água dos rios.

Nas unidades E1 e E2 as outorgas são aproximadamente 50% destinadas à agropecuária e entre 18% e 22% destinadas ao consumo humano. A captação também é cerca

de 50% feita superficialmente. Já nas unidades G1 e G2 o uso agropecuário é de 55% e 68% das outorgas, respectivamente, com captação superficial de 55% a 57%. Dessa forma, embora o número absoluto de outorgas nas unidades do clima sub-regional G sejam menores em comparação às unidades A, D e E, a demanda pelo uso agropecuário é maior em uma região que está condicionada a um balanço hídrico anual negativo e que depende entre 55% e 57% da captação superficial de água nos cursos d'água locais. Isso demonstra a importância que as regiões elevadas da bacia possuem para manutenção da vazão do rio principal, já que elas são áreas de excedente hídrico. Especialmente as unidades C3 e F têm uma importância grande para a manutenção da vazão no baixo Velhas já que elas consistem em unidades locais de excedente inseridas em uma região deficitária.

A unidade F, especialmente, abrange uma área de cabeceira de cursos d'água de contribuição direta e da bacia do Rio Bicudo, importante afluente do baixo Velhas. Nesta região há alguns cursos d'água intermitentes, o que faz com que a disponibilidade de água nos meses secos seja um dos grandes problemas na região que possui uma população rural expressiva que utiliza a água na produção agropecuária. O caso da bacia do Rio Bicudo é crítico, uma vez que o próprio CBH-Velhas solicitou ao IGAM, em 2018, a declaração de conflito pelo uso da água na Unidade Territorial Estratégica Rio Bicudo, uma vez que nela a demanda pelo uso da água, sobretudo pela agropecuária, é superior à oferta (CBH-VELHAS, 2019). Assim, o excedente hídrico da unidade F é de extrema importância para manutenção da vazão dos rios locais. Porém nesta unidade a demanda hídrica pela agropecuária também é elevada, de 61%, e o próprio uso da terra é predominantemente de pastagens e da silvicultura, não havendo nem uma unidade de conservação na região que possa garantir a preservação dos mananciais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo principal realizar uma análise das relações entre controles climáticos de superfície e a resposta atmosférica a eles na bacia hidrográfica do Rio das Velhas. Duas hipóteses foram levantadas para responder à questão de pesquisa. A primeira afirma que “a *variação da latitude e da altitude são controles primordiais do padrão térmico da bacia, condicionando as áreas de menor latitude e maior altitude aquecidas em relação às áreas de maior latitude e menor altitude, enquanto a rugosidade da superfície responde pela distribuição de chuvas, sendo as áreas de relevo mais rugoso, mais chuvosas em relação às áreas de relevo menos rugoso*”. Observou-se que a altitude é o controle principal tanto da temperatura quanto da precipitação no nível regional e local, enquanto na escala zonal a posição latitudinal da bacia define os padrões de sazonalidade do clima observados.

A altitude e a rugosidade da superfície apresentaram índices de correlação com a precipitação semelhantes (0,67 e 0,64, respectivamente), o que atesta a importância dessas características para a definição da variação espacial do atributo climático em escala regional, sub-regional e local. As áreas mais altas e rugosas da bacia são as mais chuvosas em comparação com as áreas rebaixadas e planas. No entanto, a variação latitudinal também tem uma importância significativa para a distribuição de chuvas na bacia. Nas latitudes mais baixas os totais pluviométricos são menores devido à passagem de sistemas atmosféricos instáveis que se dá de sul para norte da bacia, e quando esses atingem o baixo Velhas chegam com menor umidade do que a que continham na alta bacia. Um exemplo disso é que no trimestre mais chuvoso (NDJ) o acumulado de chuvas em Várzea da Palma é considerável (523,3mm), porém menor do que nas regiões que também estão em áreas abaixo dos 1000 metros de altitude, mas em latitudes mais altas como Curvelo (640,5mm) e Sete Lagoas (776,6mm). Assim, a segunda hipótese levantada neste trabalho que afirma que a “*borda leste (Serra do Espinhaço) e a região sul da bacia (Quadrilátero Ferrífero) consistem em áreas de barreira orográfica em função das altitudes mais elevadas motivo pelo qual as bordas e o sul da bacia são mais úmidos e o centro, norte e oeste, mais secos*” provou-se verdadeira. Porém, deve-se adicionar aí o efeito da variação latitudinal sobre a redução das precipitações na direção sul-norte da bacia.

Quanto à temperatura do ar ficou evidente o efeito da altitude sobre a variação espacial térmica da bacia, enquanto a variação mensal é resultante da posição latitudinal do Rio das Velhas. A rarefação do ar, à medida em que se eleva a superfície, gerou o efeito de amenização das temperaturas tornando os climas de áreas de maior altitude mais frios do que nas áreas baixas. Por outro lado, a variação do ângulo de incidência da radiação solar ao longo do ano, tornando

a intensidade da radiação mais forte nos meses de verão e menor nos meses de inverno, condiciona a maior chegada de radiação à superfície no verão e, portanto, mais energia disponível para o aquecimento da atmosfera. A nível local o efeito da altitude supera o do uso e ocupação da terra sobre a temperatura uma vez que ambientes florestais e campestres existentes em altitude semelhante (Quadrilátero Ferrífero x Serra do Espinhaço) apresentam perfis térmicos semelhantes.

Dessa forma, as variáveis meteorológicas relacionam-se com as características geológicas da superfície em nível local/sub-regional com a seguinte ordem de importância: altitude, rugosidade, latitude. A influência do uso da terra nos climas sub-regionais e locais não foi detectada a partir da base de dados meteorológicos utilizada, porém sabe-se que o uso da terra urbano pode influir em nível local e níveis inferiores sobre a temperatura do ar, já que um mesoclima urbano já foi identificado na cidade de Belo Horizonte (ASSIS, 2010).

Um dos objetivos específicos da pesquisa foi a elaboração de uma carta síntese das unidades climáticas da bacia e um modelo conceitual do clima por meio de perfis geológicos. A princípio a escala sub-regional foi definida como objetivo do mapeamento. No entanto, a metodologia utilizada permitiu avançar para o nível local, associando-o aos níveis superiores. Assim, inicialmente foi adotada a classificação de IBGE (2002) para definição do clima zonal, sendo ele o clima Tropical Brasil Central que se caracteriza pela predominância da atuação do anticiclone subtropical e de pequenas altas continentais com duas estações bem definidas, chuvosa (verão), onde ocorre a participação de sistemas atmosféricos instáveis (ZCAS, ZCOU, FF e LI), e seca (inverno), onde predomina a atuação do ASAS e participações do APAS.

A interação entre os controles de superfície e os atributos climáticos apontou para a configuração de duas unidades regionais que se distinguem pela superfície elevada do Quadrilátero Ferrífero e da Serra do Espinhaço, onde se manifesta o Clima Tropical de Altitude, e as terras rebaixadas da depressão do Rio São Francisco, onde manifesta-se o clima Tropical Típico. Dentro dessas unidades há distinções nas características médias do relevo que justificaram a divisão em sete climas sub-regionais e dez climas locais, para as quais o relevo foi o principal fator de corte, seguido pela precipitação, balanço hídrico e perfil térmico anual.

Em relação à variabilidade interanual da precipitação na bacia, foi identificado que os desvios de chuva em relação aos anos normais ocorrem na estação chuvosa, mantendo-se a estação seca sem alterações significativas. Assim, nos anos secos a precipitação reduz de

setembro a maio, sendo o auge o mês de janeiro que pode apresentar até um terço do esperado em um ano normal, e nos anos chuvosos ela eleva-se de outubro a março, chegando a dobrar no mês de janeiro em relação aos anos normais.

Os mecanismos da sazonalidade das chuvas na bacia hidrográfica do Rio das Velhas perpassam pela variação mensal da insolação na bacia e, portanto, da energia que alimenta os sistemas atmosféricos. Já os mecanismos de variabilidade anual da precipitação apontam possíveis influência do ENOS e ODP, ainda que não muito evidentes. A complexidade do clima na região Sudeste do país pressupõe que a variabilidade e oscilação da precipitação na bacia do Rio das Velhas está atrelada a um conjunto de mecanismos globais e zonais que vão além dos fenômenos de tele conexão ENOS/ODP. Assim, não foi possível identificar relações fortes entre os fenômenos de tele conexões analisados aqui com a precipitação na bacia hidrográfica do Rio das Velhas, porém algumas considerações podem ser feitas.

A fase quente da ODP contribuiu com a média mais elevada de precipitação, sobretudo nos trimestres mais chuvosos (NDJ-JFM) entre 1961 e 2019. Os trimestres em que o ENOS se encontra em fases neutras são mais chuvosos de JFM a SON, principalmente em associação à ODP Quente, enquanto os trimestres NDJ e DJF apresentam maior precipitação sob El Niño. Minuzzi *et al.* (2005) também observou um aumento das precipitações no início da estação chuvosa na região central e sul de Minas Gerais sob efeito do El Niño, enquanto Santos (2011) observou anomalias negativas quando houve a associação entre as fases frias da ODP e ENOS na parte mineira da bacia hidrográfica do Rio São Francisco.

A relação entre esses fenômenos e os anos padrão na bacia demonstra que, embora haja ocorrência de ENOS/ODP em ambas as associações nos anos normais, predomina a ODP Fria, sobretudo em associação ao La Niña. Nos anos extremos (secos e chuvosos) observa-se mais trimestres na ODP Fria em anos secos, e o contrário nos anos chuvosos. Nos anos secos, inclusive, aconteceram eventos ENOS de sinais opostos a ODP, o que reforça a bibliografia que indica que fases contrárias desses eventos desfavorecem a precipitação (ANDREOLI e KAYANO, 2005; PRADO, 2011; SILVA *et al.*, 2012). Por fim, ressalta-se que as observações feitas a partir dessa análise não são conclusivas e carecem de mais investigação que aponte a relação desses fenômenos com os mecanismos zonais da circulação atmosférica sobre a América do Sul e o comportamento da TSM do oceano Atlântico Sul.

Em relação aos procedimentos testados para delimitação das unidades climáticas, o PCA+K-means se mostrou ser um método útil à visualização de áreas semelhantes quantos aos

valores médios dos dados meteorológicos e superficiais que determinaram respostas climáticas de uma maneira integradora, proporcionando maior fundamentação à visão do pesquisador na delimitação das unidades. Uma vantagem da ferramenta é a possibilidade de se considerar na análise múltiplas variáveis e *clusterings* com o método K-means. Esta última característica permite uma classificação multinível que vai das escalas superiores até as menores escalas, como o topoclima, desde que se tenha disponível dados de alta resolução espacial. Entretanto, o desafio do pesquisador é justamente dispor de uma base de dados refinada. Neste trabalho, foram utilizados dados matriciais de aproximadamente 4,5km de resolução que permitiram a delimitação até a escala local.

Embora apresente as vantagens citadas, o PCA+Kmeans não dá resoluções prontas quanto à delimitação de unidades climáticas. É preciso a expertise do pesquisador em identificar qual número de classes corresponde à escala climática que se deseja mapear. Para isso, é necessário o diagnóstico das interações superfície-atmosfera na área de estudo que permita a identificação das relações entre controles geográficos e atributos climáticos em diferentes níveis, além de permitir que o pesquisador tenha consciência de aspectos do clima que o método não é capaz de modelar. Um exemplo disso é a classificação da Serra do Cabral pelo PCA+K-means que em sua maior parte foi unida à unidade climática que inclui a Serra do Repartimento, na borda oeste da bacia, com uma pequena área atribuída ao clima da Serra do Espinhaço. No entanto, a área foi classificada em nível sub-regional como parte do Espinhaço devido ao contexto geocológico muito semelhante entre os locais. O mesmo ocorreu entre o clima do Quadrilátero Ferrífero e da Serra do Cipó que, embora fossem distinguidos como um só pelo método, foram separados em duas unidades em função de características distintas do relevo entre elas que resultam em velocidades do vento e a amplitude pluviométrica nessas áreas. Sendo assim, este não é um método isento de subjetividade.

Quanto à análise multicritérios, método que também foi testado para o mapeamento das unidades climáticas, o resultado demonstrou semelhança com o cluster de seis classes definido pelo PCA+Kmeans, porém com um nível de detalhamento maior. Como a intenção foi gerar unidades em escala sub-regional, a delimitação do PCA atendeu melhor ao objetivo, porém a análise multicritérios já se provou uma metodologia útil tanto ao mapeamento de climas (OLIVEIRA *et al.*, 2021). Por outro lado, esse método necessita da definição das variáveis envolvidas na diferenciação das unidades climáticas e os pesos atribuídos a cada uma delas pelo pesquisador, sendo necessário o conhecimento prévio a respeito da área por meio de um diagnóstico que norteie a definição destes valores. Assim, apresenta um potencial de

replicação para outras áreas, desde que haja o cuidado do pesquisador em elaborar um diagnóstico que permite definir as principais características da superfície envolvidas nos climas estudados e sua hierarquia na definição de tais climas. Outra limitação é o número de variáveis de entrada que não pode ser extenso, já que reduziria a importância individual de cada uma delas a um nível insignificante para a modelagem, desvantagem essa que o PCA não apresenta já que neste pode-se incluir quantas variáveis seja desejado, com exceção daquelas categóricas.

Cabe ressaltar que os resultados tanto do PCA+K-means quanto da análise multicritério gera ruídos típicos da estrutura de entrada matricial dos dados, havendo a necessidade da intervenção do pesquisador na delimitação dos limites das unidades a fim de produzir um material cartográfico refinado. Também se destaca que as unidades climáticas delimitadas servem como artifício analítico das características climáticas observadas na área de estudo, sendo os limites apresentados variáveis ao longo de meses e anos conforme a alternância dos sistemas atmosféricos e a variabilidade natural do clima.

Quanto à principal base de dados meteorológicos utilizada neste trabalho, o TerraClimate tem a vantagem de disponibilizar dados mensais de 1959 até o presente, sendo anualmente atualizada. O fornecimento em formato matricial facilita sua utilização em estudos de análise espacial, fornecendo uma resolução suficiente para estudos que abrangem o meso e o macroclima. Os dados TerraClimate são validados e utilizados em estudos por pesquisadores de diversos países (ABDI, 2019; LOURENÇO *et al.*, 2019; SILVA e MANZIONE, 2019; GOMES, 2020; HUERTA *et al.*, 2020; MAGNONI, 2020). Eles, no entanto, exigem do pesquisador a habilidade de processamento em massa que é oportuna frente à necessidade cada vez maior de análises que envolvam os *big data*. No que diz respeito a isso, o *software* DINAMICA EGO versão 5, desenvolvido na Universidade Federal de Minas Gerais pelo Centro de Sensoriamento Remoto (CSR), oferece uma série de vantagens por ter uma interface gráfica amigável, expertise no tratamento de dados matriciais, permitir análises complexas em hardwares de configuração popular e ser uma plataforma de modelagem gratuita.

Um aspecto importante dessa pesquisa é a preocupação em tornar a linguagem científica acessível ao público mais interessado em seus resultados: gestores e a sociedade civil. Por isso foi idealizado um *site* para divulgação dos resultados da pesquisa em uma linguagem simples e didática, e a disponibilização dos produtos cartográficos e gerados que pudessem compor outros estudos sobre a bacia. Ao longo da pesquisa atestou-se o interesse de outros pesquisadores em utilizar o *Webmap* incorporado à plataforma para divulgação de seus produtos. Assim, elaborou-se uma plataforma colaborativa que poderá ser utilizada para

divulgação e compartilhamento de dados científicos da bacia hidrográfica do Rio das Velhas. Essa é uma iniciativa que visa contribuir com a popularização da ciência e uma contrapartida da academia à sociedade.

Sobre as questões hídricas que a bacia enfrenta atualmente, é possível fazer algumas observações. Embora somente o baixo Velhas e uma parte do Médio Baixo Velhas estejam submetidos a um balanço hídrico anual deficitário, toda a bacia encontra-se em déficit hídrico durante pelo menos 6 meses do ano (maio a outubro). Nesse período, mesmo áreas onde o excedente hídrico anual é elevado, como o Alto Velhas, sofrem com a insegurança hídrica no abastecimento (MELO, 2016). O Alto e o Médio Alto Velhas são as regiões que agrupam o maior número de outorgas do uso da água na bacia, já que aí se instala atividades econômicas de importância estadual, como a mineração e a indústria na RMBH, e é também a área de maior concentração da população em toda a bacia, havendo uma significativa demanda para o consumo humano. A captação para essa finalidade é feita superficialmente no rio, sendo vulnerável à vazão do mesmo que é reduzida no período de seca. Além disso é preciso considerar que a variabilidade anual da precipitação também afeta essa disponibilidade uma vez que a região apresenta naturalmente uma alternância entre anos secos e chuvosos de difícil previsibilidade.

Por isso, é recomendado que no Alto e Médio Alto Velhas seja feita a proteção das nascentes e áreas de proteção permanente com especial atenção a fim de se gerar a manutenção do volume d'água dos rios, que garanta o abastecimento para usos múltiplos, além da necessidade de ações do poder público em prol do tratamento universal dos efluentes. Melo (2016) também defende a revisão das aprovações de parcelamento do solo na porção sul da RMBH, visto que nesta área se concentram os principais mananciais de abastecimento da metrópole. Além disso, a autora destaca a necessidade do aprimoramento tecnológico constante das atividades minerárias desenvolvidas na região a fim de minimizar os impactos da atividade e a aplicação de controles na operação e requisitos rígidos de descomissionamento de barragens que deve diminuir a pressão sobre os recursos hídricos na região.

Nessas regiões também é importante a participação da agropecuária no número de solicitação de outorgas do uso da água, que varia entre 30 e 50%. Assim, é necessária a fiscalização da adequação das propriedades rurais ao Código Florestal Brasileiro com o mesmo propósito de se preservar as áreas necessárias para a manutenção da qualidade e quantidade de água.

No Médio Baixo e Baixo Velhas a demanda de outorgas pela agricultura é majoritária, chegando a 68% nas áreas mais próximas à foz abrangidas pelo clima local G2. Nessas regiões, a borda leste é abrangida pelos climas úmidos da Serra do Espinhaço que garantem excedente hídrico anual. Toda a área, que compõem a unidade geomorfológica das Serras do Espinhaço Meridional, ainda tem preservada cerca de 79% de sua vegetação nativa. A manutenção da vegetação nativa nessas áreas é de extrema importância, sobretudo no entorno de nascentes e cursos d'água, já que dessa região partem importantes afluentes do Rio das Velhas, e que são responsáveis pela diluição de efluentes das águas do curso principal. Além disso, o volume de água aportado por esses rios é importante para a captação para consumo e atividades econômicas do Baixo Velhas, que é feita entre 47% e 65% das outorgas de forma superficial, dependendo da vazão do rio.

Já na borda oeste seria primordial o estabelecimento de unidades de conservação que preservem as nascentes nas unidades geomorfológicas das Chapadas e Patamares do Alto Rio São Francisco onde localiza-se a Serra do Repartimento. Essa região consiste na cabeceira da sub-bacia do Rio Bicudo, importante curso d'água que drena os municípios de Morro da Garça, Corinto e Lassance, além de cursos d'água de contribuição direta que banham o município de Lassance e Várzea da Palma. Ela é abrangida pelos climas locais E2 e F, em áreas mais chuvosas do que o clima G2 da foz do rio. A agropecuária e a silvicultura são fortes consumidores da água na região, o que preocupa a comunidade e o CBH-Velhas quanto à manutenção da vazão dos rios (CBH-VELHAS, 2019). Embora sejam áreas de excedente hídrico anual, este fica entre 57mm e 123mm anuais, o que não impede a existência de cursos d'água intermitentes na área. Essas características reforçam ainda mais a necessidade de proteção das nascentes e cursos d'água da região. Portanto, é necessário proteger os cursos d'água a montante, para garantir o volume e qualidade da água que chega à jusante e estabelecer estratégias de proteção dos mananciais do baixo Velhas a fim de contornar a escassez hídrica na região, estratégia também defendida por COSTA (2021). Por fim, espera-se que este trabalho possa contribuir de alguma forma com a população envolvida na gestão de recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio das Velhas, assim como à comunidade científica que desenvolve pesquisas na bacia por meio do compartilhamento dos dados aqui gerados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABATZOGLOU, J.T.; DOBROWSKI, S. Z.; PARKS, S. A.; HEGEWISCH, K. C. Terraclimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. *Scientific Data*, v. 5, artigo n° 170191, 2017.

ABDI, O. Climate-Triggered Insect Defoliators and Forest Fires Using Multitemporal Landsat and TerraClimate Data in NE Iran: An Application of GEOBIA TreeNet and Panel Data Analysis. *Sensors*, v. 19, n. 18, artigo 3965, 2019.

ABREU, M. L. Climatologia da estação chuvosa de Minas Gerais: de Nimer (1977) à Zona de Convergência do Atlântico Sul. *Geonomos*, v. 6, n. 2, p. 17-22, 1998.

ANDREOLI, R. V., KAYANO, M. T., GUEDES, R. L., OYAMA, M. D., ALVES, M. A. S. A influência da temperatura da superfície do mar dos Oceanos Pacífico e Atlântico na variabilidade de precipitação em Fortaleza. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.19, n.3, p. 337-344, 2004.

ANDREOLI, R.V.; KAYANO, M.T. Enso-Related Rainfall Anomalies in South America and Associated Circulation Features During Warm and Cold Pacific Decadal Oscillation Regimes. *Internacional Journal Climatology*, v.25, p. 2017–2030, 2005.

ASSIS, W. L. *O sistema clima urbano do município de Belo Horizonte na perspectiva tempo-espaço*. 2010, 299 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

AYOADE, J. O. *Introdução à climatologia para os trópicos*. 4ª.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. 332 p.

BANCO DE DADOS METEOTOLÓGICOS DO INMET – BDMEP. Banco de dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br/#>>. Acesso em: janeiro de 2019.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. *Atmosfera, tempo e clima*. 9ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 512p.

BAUMÜLLER, J; HOFFMAN, U; REUTER, U. *Climate booklet for urban development: indications for urban land-use planning*. Ministry of Economy BadenWuerttemberg (Wirtschaftsministerium), Environmental Protection Department (Amt für Umweltschutz). 2012. 275p.

BELIZÁRIO, W. S. Geossistemas e climatologia geográfica: estudos integrados do clima em bacias hidrográficas. *Revista Sapiência: sociedade, saberes e práticas educacionais*, v. 3, n. 2, p. 2-21, 2014.

BORSAGLI, A. As precariedades da drenagem urbana de Belo Horizonte. Sítio virtual Curral Del Rey, s.d. Disponível em: <<http://curraldelrei.blogspot.com/2011/12/as-precariedades-da-drenagem-urbana-de.html>>. Acesso em: maio de 2021.

BOTELHO, R.G.M. Planejamento Ambiental em microbacia. In: GUERRA, A.T. SILVA, A.S., BOTELHO, R.G.M. (org.) Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999, p. 269-293.

BOTELHO, R.G.M.; SILVA, A.S.; VITTE, A.C. Bacia hidrográfica e qualidade ambiental. In: VITTE, A.C.; GUERRA, A.J.T. Reflexões Sobre a Geografia Física no Brasil. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. p. 153-193.

BRASIL. *Lei N.º 9.433*, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, 8 de janeiro de 1997; 176º da Independência e 109º da República.

BRITTO, F. P.; BARLETTA, R.; MENDONÇA, M. Variabilidade espacial e temporal da precipitação pluvial no Rio Grande do Sul: influência do fenômeno El Niño Oscilação Sul. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 3, p. 37-48, 2008.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. *Bioestatística: princípios e aplicações*. Artmed Editora, 2009. 253p.

CAMARGO, A. Paes. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. *Bragantia*, Campinas, v.21, p.163-203, 1962.

CARMO, A. M. R. *Sucessão e encadeamento de tipos de tempo e repercussão espacial da temperatura e umidade do ar em Belo Horizonte e municípios limítrofes no período entre 26/10/2012 e 25/11/2012*. 2013, 85f. Monografia (Bacharelado em Geografia), Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

CARVALHO, A. T. F. Bacia hidrográfica como unidade planejamento: discussão sobre os impactos da produção social na gestão de recursos hídricos no Brasil. *Caderno Prudentino de Geografia*, v. 1, n. 42, p. 140-161, 2020.

CASTRO, I. E. O problema da escala. In: CASTRO, I. E. et al. (Orgs.) *Geografia: conceitos e temas*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995.

CAVALCANTI, I. F. A. Episódios El Niño / Oscilação Sul durante a década de 1986 a 1996 e suas influências sobre o Brasil. *Boletim Climanalise*. S.d. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/nino.html>>. Acesso em: junho de 2018.

CAVALCANTI, I. F.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A.; DIAS, M. A. F. S. (Org.). *Tempo e clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 463p.

CHRISTOFOLETTI, A. *Modelagem de sistemas ambientais*. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 1999, 256p.

COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS – CBH-VELHAS. *Baixa vazão coloca o Rio das Velhas em estado de atenção*. Sítio virtual do CBH-Velhas. 10/05/2021. Disponível em: <<https://cbhvelhas.org.br/noticias/baixa-vazao-coloca-o-rio-das-velhas-em-estado-de-atencao/>>. Acesso em: 22/06/2021.

COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS – CBH-VELHAS. *Projetos hidroambientais*. Sítio virtual do CBH-Velhas. S.d. Disponível em: <<https://cbhvelhas.org.br/projetos-hidroambientais/>>. Acesso em: novembro de 2019.

COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS – CBH-VELHAS. *Projetos CBH-Velhas*. Sítio virtual do CBH-Velhas. 2014. Disponível em: <<https://cbhvelhas.org.br/>>. Acesso em: novembro de 2019.

COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS – CBH-VELHAS. *Um dos principais afluentes do Velhas, Rio Bicudo sofre em meio a estiagem e está “cortado”*. Sítio virtual do CBH-Velhas. 11/10/2019. Disponível em: <<https://cbhvelhas.org.br/noticias/um-dos-principais-afluentes-do-velhas-rio-bicudo-sofre-em-meio-a-estiagem-e-esta-cortado/>>. Acesso em: 22/06/2021.

CONTI, J. B. As escalas do clima. *Apostila do curso de Geografia*. Departamento de Geografia-Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 1995. 5p.

COSSO, S. P. A.; AMARAL, P. S.; MARIOSA, D. F. As mudanças do clima e os desafios da gestão dos recursos hídricos nas bacias do PCJ. *Período Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista*, v. 16, n. 5, p. 20-34, 2020.

COSTA, A. H. G. *Análise da dinâmica hidroclimatológica da bacia hidrográfica do Rio das Velhas – MG no período de 1961 a 2020*. Dissertação (Mestrado em Geografia), Unimontes, 2021.

COSTA, M. A. M. *Reflexões sobre a política participativa das águas: o caso CBH Velhas (MG)*. 2008, 134f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

DICKEL, M. E. G.; GODOY, M. B. R. B. Desastres ambientais e impactos socioambientais: inundações no município de ItaócaSP: Bacia Hidrográfica como unidade de planejamento e gestão de riscos. *Caderno de Geografia*, v. 26, n. 47, p. 737-759, 2016.

DOMINGOS NETO, E. *Reunião sobre o projeto de pesquisa de mapeamento de unidades climáticas na bacia hidrográfica do Rio das Velhas*. Entrevista concedida a Lilian Aline Machado. Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas, junho de 2019

ESRI. *A quick tour of geoprocessing tool references*. ESRI Website. Disponível em: <<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/main/tools/a-quick-tour-of-geoprocessing-tool-references.htm>>. Acesso em: outubro de 2020.

FEITOZA, L. R.; CASTRO, L. L. F. de; RESENDE, M.; ZANGRANDE, M. B.; STOCKING, M. A.; BOREL, R. M. A.; CERQUEIRA, A. F.; SALGADO, J. S.; FEITOZA, H. N.; FULLIN, E. A.; STOCK, L. A.; DESSAUNE FILHO, N.; MANK, A. M.; FERINGA, W.; MARTINEZ, J. A. *Mapa das Unidades Naturais do Estado do Espírito Santo: informações básicas*. Vitória, ES: Incaper. 2010.

FERNANDES, S. C. M.; SILVA, L. O. P. L. F. Ação antrópica e influência em termos bioclimáticos: parâmetros para regeneração na Bacia hidrográfica do Aricanduva, no município de São Paulo. *Revista ClimaCom, Coexistências e Cocriações*, n. 20, 27p., 2021.

FERREIRA, M.C. *Iniciação a análise geoespacial*. São Paulo: UNESP, 2014. 344p.

FERREIRA, N. J.; RAMÍREZ, M. V.; GAN, M. A. Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis que atuam na vizinhança do Nordeste do Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (Org.). *Tempo e clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, p. 43-60, 2009.

FIRPO, M. Â. F.; SANSIGOLO, C.A. Impacto das fases da ODP nas relações entre o ENOS e as anomalias de TSM no Atlântico Sudoeste. *Anais... XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 2010, Belém/PA.

FOLHA DE SÃO PAULO. Pior Enchente de Minas Gerais foi em 79. *Folha de São Paulo*, Cotidiano, 17 de janeiro de 2003. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/folha/cotidiano/ult95u66816.shtml>>. Acesso em: maio de 2021.

FREIRE, J. L. M.; LIMA, J. R. A.; CAVALCANTI, E. P. Análise de Aspectos Meteorológicos Sobre o Nordeste do Brasil em Anos de El Niño e La Niña. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.4, n.3, p. 429-444, 2011.

GALVINCIO J. D.; SOUSA, F. A. S. Relação entre o fenômeno El Niño e os totais mensais de precipitados na bacia hidrográfica do rio São Francisco. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 7, n. 4, 2002, p. 113-119.

GAN, M.; SANTOS, L. F.; LIMA, J.; AFONSO, J. M. S.; SILVA, A. B. Monção da América do Sul. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – CPTEC/INPE, São José dos Campos – SP, 7p., 2016.

GARCIA, S. R. *Variabilidade do sistema de monção da América do Sul: relações com a oscilação decadal do Pacífico?* Dissertação (Mestrado), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006. 142p.

GAUSSEN, H.; BAGNOULS, F. Estação seca e índice xerotérmico. *Boletim geográfico*, ano XX, n. 169: 37.696, 1962. (tradução de Ruth Simões Bezerra dos Santos).

Gomes, R. S. *Influência da variabilidade climática nos volumes dos reservatórios do Nordeste do Brasil*. Dissertação (Mestrado em Ciências Climáticas), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2020. 139p.

GRIMM, A.M.; TEDESCHI, R.G. Influência de eventos El Niño e La Niña sobre a frequência de eventos extremos de precipitação no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, SBMet, Fortaleza, CE. *Anais...CD-Rom*. 2004.

GUSMÃO, A. M. Sítio virtual do Centro de Pesquisa Tecnológica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. *Alta da Bolívia*. S.d. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~reclimanl/boletim/cliesp10a/17.html>>. Acesso em: agosto de 2019.

HUERTA, A.; LAVADO, W.; AND RAU, P. The vulnerability of water availability in Peru due to climate change: A probabilistic Budyko analysis, *EGU General Assembly 2020*, EGU2020-3766, 2020. Disponível em:

<<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020EGUGA..22.3766H/abstract>>. Acesso em: junho de 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. *Base cartográfica digital em formato shapefile contendo a compartimentação do relevo brasileiro*. Escala 1:250.000. 2017. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/geomorfologia/15827-unidades-de-relevo.html?=&t=downloads>>. Acesso em: abril de 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. *Base cartográfica digital em formato shapefile contendo os limites municipais e estaduais*. Escala 1:250.000. 2018. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?edicao=24048&t=sobre>>. Acesso em: abril de 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. *Censo demográfico de 2010*. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Demografico_2010>. Acesso em: julho de 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Mapa de clima do Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE, 2002. Escala 1:5 000 000.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. *Base cartográfica digital em formato shapefile contendo a rede hidrográfica do Estado de Minas Gerais*. Escala 1:250.000. 2014. Disponível em: < <http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>>. Acesso em: abril de 2019.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. *Outorgas de direito de recursos hídricos*. 2021. Disponível em: <<http://sisemanet.meioambiente.mg.gov.br/mbpo/portal.do>>. Acesso em: junho de 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET: *Normais Climatológicas Provisórias* - Brasil de 1981 a 2010. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária – Departamento Nacional de Meteorologia.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET: *Sítio virtual do INMET*. Contém informações sobre a metodologia utilizada pelo órgão para o estabelecimento do balanço hídrico climático. s.d. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/html/agro.html>>. Acesso em: novembro de 2013.

JARDIM, C. H. Aspectos Multiescalares e Sistêmicos da Análise Climatológica. *Geografias*, p. 40-52, 2015.

JARDIM, C. H. *Proposta de síntese climática a partir do comportamento térmico e higrométrico do ar em áreas urbanas*. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade de Campinas, 2007. 338p.

JARDIM, C. H; SILVA, M. R. Extremos de temperatura do ar em Belo Horizonte: variabilidade natural e influência do clima urbano. *Revista do Departamento de Geografia*, p. 83-97, 2016.

JESUS, E. F. R. Algumas reflexões teórico-conceituais na climatologia geográfica em mesoescala: uma proposta de investigação. *Geotextos (UFBA)*, v. 4, p. 165-187, 2008.

KELTING, F. M. S. O clima e a paisagem da bacia hidrográfica do litoral – Estado do Ceará. *Boletim Goiano de Geografia*, v. 29, n. 2, p. 83-99, 2009.

LANG, BLASCHKE, S.; BLASCHKE, T. *Análise da paisagem com SIG*. São Paulo: Oficina de Texto, 2009. 424p.

LEVIGH, S. C.; VIADANA, A. G. Perfis-ecológicos como técnica para o estudo das condições ambientais. *Sociedade e Natureza*, v. 14, n. 26/9, 2002/2003.

LOURENÇO, M.; QUEVEDO, D. M.; PEREIRA, M. A. F.; ADAM, K. N. Análise da chuva na bacia hidrográfica do Rio dos Sinos. *Anais...XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Foz do Iguaçu – PR, 10p., 2019.

LUCENA, D. B.; GOMES FILHO, M. F.; SERVAIN, J. Avaliação do impacto de eventos climáticos extremos nos oceanos Pacífico e Atlântico sobre a estação chuvosa no nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 26, n. 2, p. 297-312, 2011.

MACHADO, L. A. *Impactos da verticalização e adensamento das edificações em topoclimas e mesoclimas na porção norte do município de Nova Lima (MG)*. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal de Minas Gerais, 2016. 188p.

MACHADO, L. A.; GONÇALVES, I.; MAGALHÃES, M. A. N.; ASSIS, W. L. Análise do comportamento térmico e higríco em área do Parque Nacional da Serra do Cipó. *Anais... XI Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica*, Curitiba, v. 1. p. 449-460, 2014.

MACHADO, L. A.; ASSIS, W. L. Comparação entre métodos de preenchimento de falhas em séries de dados meteorológicos da bacia hidrográfica do Rio das Velhas (MG). *Revista GEOgrafias*, v. 16, p. 73-90, 2018.

MACHADO, L. A.; ASSIS, W. L. Implicações da verticalização na circulação atmosférica local: estudo de caso no município de Nova Lima (MG). In: Charlei Aparecido da Silva, Edson Soares Fialho, Ercília Torres Steinke. (Org.). *Experimentos em Climatologia Geográfica*. 1ed. Dourados: UFGD, 2015, v. 1, p. 145-163.

MAGILLIGAN, F. J.; NISLOW, K. H. Long-term changes in regional hydrologic regime following impoundment in a humid-climate watershed. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 37, n. 6, p. 1551-1569, 2007.

MAGNONI, P. H. J. *Estimativa de recarga de águas subterrâneas por sensoriamento remoto e computação em nuvem*. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Estadual Paulista, 2020. 102p.

MAPBIOMAS; SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DO OBSERVATÓRIO DO CLIMA. *Coleção 5 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil*. 2019. Disponível em: < <https://mapbiomas.org/>>. Acesso em: julho de 2020.

MARENGO, J.A; AMBRIZZI, T; SOARES, W.R. Jatos de Baixos níveis ao longo dos Andes. IRACEMA, F.A; CAVALCANTI et al. (org.) *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p.169-180.

MARIANO, R. Redução na catação de água do rio das Velhas vai afetar 14 cidades da Grande BH. *Jornal Hoje Em Dia*, 18/09/2019. Disponível em: <<https://www.hojeemdia.com.br/horizontes/redu%C3%A7%C3%A3o-na-capta%C3%A7%C3%A3o-de-%C3%A1gua-do-rio-das-velhas-vai-afetar-14-cidades-da-grande-bh-1.743424>>. Acesso em: 22/06/2021.

MATOS, C. A. D.; TORRES, A. S.; LANDULFO, E.; NAKAEMA, W. M.; UEHARA, S. T.; SAWAMURA, P.; JESUS, W. D. Estudo de camada limite planetária com o uso de um 118 Referências bibliográficas lidar de retroespalhamento em São Paulo, Brazil. In: *Anais... XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 2007.

MELO, M. C. *Segurança hídrica para abastecimento urbano: proposta de modelo analítico e aplicação na bacia do Rio das Velhas, Minas Gerais*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Minas Gerais, 2016. 252 p.

MENDONÇA, F. de A & DANNI-OLIVEIRA I. M. Dinâmica atmosférica e tipos climáticos predominantes da bacia do rio Tibagi. In: *A Bacia do Rio Tibagi*. MEDRI, M. E. Londrina, 2002.

MENDONÇA, F; DANNI-OLIVEIRA, I. M. *Climatologia: noções básicas e clima do Brasil*. 1ª ed. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2007. 206p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. *Áreas protegidas, arquivo shapefile*. 2018. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/areas-protegidas/cadastro-nacional-de-ucs/mapas.html>>. Acesso em: junho de 2019.

MINUZZI R. B., SEDIYAMA G. C.; RIBEIRO A.; COSTA J. M. N. El Niño: ocorrência e duração dos veranicos do Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 9, n. 3, p. 364-371, 2005.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). *Brasil em Relevo*. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: julho de 2019.

MOLION, L. C. B. *Aquecimento global, El Niños, Manchas Solares, Vulcões e Oscilação Decadal do Pacífico*, Climanalise, CPTEC/INPE, Agosto, 2005.

MONTEIRO, C. A. F. A dinâmica climática e as chuvas do Estado de São Paulo: estudo geográfico sob forma de atlas. São Paulo: IGEOG, 1973.

MONTEIRO, C. A. F. Derivações antropogênicas dos geossistemas terrestres no Brasil e alterações climáticas: perspectivas urbanas e agrárias ao problema da elaboração de modelos de avaliação. *RA'EGA (UFPR)*, n. 5, p. 197-226, 2001.

MONTEIRO, C. A. F. O estudo geográfico do clima. *Cadernos de Geografia*, Florianópolis, nº 1, p. 7-37. 1999.

MONTEIRO, C. A. F. *Teoria e clima urbano*. São Paulo: IG06-USP, 1976. (Série Teses e Monografias n. 25). 181p

MOREIRA, G. A. A. *Desenvolvimento de modelos de camada limite atmosférica aplicados a micro-regiões*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. 214p.

MOREIRA, G. A. *Métodos para obtenção da altura da Camada Limite Planetária a partir de dados de lidar*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Universidade de São Paulo. 2013, 154p.

MOURA, F. P.; MACHADO, L. A.; JARDIM, C. H.; BARRETO, A. A. Correlações entre o relevo, ocupação urbana, temperatura e umidade relativa do ar: estudo de caso na região metropolitana de Belo Horizonte/M. *Anais... Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada: uso e ocupação da terra e as mudanças das paisagens*. Vitória: Editora da UFES, 2013. v. 1. p. 138-147.

MOURÃO, A. C. Reflexões metodológicas como subsídio para estudos ambientais baseados em Análise de Multicritérios. *Anais...XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 2899-2906.

MUSETTI, R. A. Bacias Hidrográficas no Brasil: aspectos Jurídico-ambientais. *Revista Consultor Jurídico*, 13 de outubro de 1999.

NASCIMENTO JÚNIOR, L.; SANT'ANNA NETO, J. L. Contribuição aos estudos da precipitação no estado do paraná: a Oscila o Decadal Do Pacífico - ODP. *RA'E GA (UFPR)*, v. 35, p. 314-343, 2016.

NAZÁRIO, R. O.; ANDRADE, L. T. Da Favela para o conjunto: a periferia no entorno da nova cidade administrativa de Minas Gerais. *Cadernos de Arquitetura e Urbanismo*, v. 17, n. 21, p. 55-71, 2010.

NIMER, E. Um modelo metodológico da classifica o de climas. *Revista Brasileira de Geografia - IBGE*, Rio de Janeiro, n. 4, ano 41, p. 59-89, 1979.

OKE, T. R. *Boundary layer climates*. London: Methuen & Co. LTD, 1978. 372p.

OLIVA, F. G. Climatologia e variabilidade dos principais sistemas meteorológicos atuantes no Brasil, rela o com chuvas intensas e impactos relacionados. *GeoPuc*, Rio de Janeiro, v. 12, n. 23, p. 74-99, 2019.

OLIVEIRA, D. E. *Classifica o de unidades fisionômicas e paisagens para a bacia hidrográfica do Rio Paraibuna – MG/RJ, a partir de um diagnóstico ambiental*. (Monografia) Gradua o em geografia, Universidade Federal de Juiz de Fora. 2013, 118p.

OLIVEIRA, D.; FERREIRA, D. Aspectos climáticos da bacia hidrográfica do rio Preto – MG/RJ, Brasil, influência dos fatores geográficos na forma o desse clima regional. *Geografia e Ordenamento do Território*, n. 11, 283-307, 2017.

OLIVEIRA, J. Comitê do rio das velhas teme colapso no uso da água que abastece BH e região. *Jornal Estado de Minas*, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2018/11/28/interna_gerais,1008643/comitedo-rio-das-velhas-teme-colapso-no-uso-da-agua-que-abastece-bh.shtml>. Acesso em: julho de 2019.

OLIVEIRA, U.; SOARES-FILHO, B. S.; COSTA, W. L. S.; GOMES, L.; BUSTAMANTE, M.; MIRANDA, H. Modeling fuel loads dynamics and fire spread probability in the Brazilian Cerrado. *Forest Ecology and Management*, 482: 118889, 2021.

PEREZ, L. P. *Índice de vulnerabilidade urbana a alagamentos e deslizamentos de terra, em função de eventos extremos de clima, na Região Metropolitana de São Paulo: uma proposta de método*. Tese (Doutorado em Geografia), Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, 2013. 141p.

PESSÔA, F. S.; FAÇANHA, A. C. A bacia hidrográfica como unidade geossistêmica e territorial: em questão a bacia do Parnaíba. *Regne*, v. 2, número especial, p. 735-744, 2016.

PLANO DIRETOR DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS – PDRH. *Plano diretor de recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio das Velhas* - Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas, 2015.

PRADO, L. F. *Oscilação Interdecadal do Pacífico e seus impactos no regime de precipitação no Estado de São Paulo*. Dissertação (mestrado em Ciências), Universidade de São Paulo, 2011. 133p.

QUEIROZ, M. A. *Avaliação de tendências em séries de precipitação diária máxima anual na faixa central de Minas Gerais*. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). 2013. 202p.

REN, C.; YAN-YUNG, E; KATZSCHNER, L. Urban climatic map studies: a review. *International Journal of Climatology*, n. 31, p. 2213-2233, 2010.

RIBEIRO, A. G. As escalas do clima. *Boletim Geografia Teórica*, Rio Claro, v. 23, p. 45-49, 1993.

RODRIGUES, E.; SILVA, F. Belo Horizonte e a insegurança hídrica. *Revista Manuelzão*, n. 86, dez. 2019. Disponível em: <<https://manuelzao.ufmg.br/biblioteca/revista-manuelzao-86/>>. Acesso em: 22/06/2021.

RODRIGUEZ, J.M.M.; SILVA, E. V. *Planejamento e gestão ambiental: subsídios da agroecologia das paisagens e da teoria geossistêmica*. Fortaleza: edições UFC, 2013.

SALGADO, A. A. R.; VALADÃO, R. C. FATORES CONTROLADORES DOS PROCESSOS DESNUDACIONAIS GEOQUÍMICOS NO ESPINHAÇO MERIDIONAL (DEPRESSÃO DE GOUVEIA, MG). *Geonomos*, v. 13, n. 1 e 2, p. 51-57, 2005.

SAMPAIO, T. V. M.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Índice de concentração da rugosidade: uma nova proposta metodológica para o mapeamento e quantificação da dissecação do relevo como subsídio a cartografia geomorfológica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, São Paulo, v.15, n.1, p.47-60, 2014.

SANT'ANNA NETO, J. L. Da complexidade física do universo ao cotidiano da sociedade: mudanças, variabilidade, ritmo climático. *Terra Livre*, n. 20, p. 51-64, 2003.

SANTOS, M. S. *Caracterização espaço-temporal de secas utilizando ondaletas e o Standardized Precipitation Index: uma aplicação para a parcela mineira da bacia do rio São*

Francisco. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011, 163p.

SANTOS, R. F. dos. Planejamento ambiental: teoria e prática. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. 184 p.

SILVA D. F.; GALVÍNCIO J. D.; NÓBREGA R. S. Influência da variabilidade climática e da associação de fenômenos climáticos sobre sub-bacias do rio São Francisco. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 19, 2011, p. 46-56.

SILVA, C. A. V.; GALVÍNCIO, J. D. Relação clima e escoamento superficial na bacia hidrográfica do Rio Pirapama-PE. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 2, n. 2, p. 57-69, 2009.

SILVA, C. O. F.; MANZIONE, R. L.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. Sensoriamento remoto orbital para manejo da irrigação: uma revisão sistêmica. *Anais... V INOVAGRI International Meeting*, Universidade Federal do Ceará, 11p., 2019.

SILVA, D. F.; SOUSA, A. B.; MAIA, L. M.; RUFINO, L. L. Efeitos da associação de eventos de ENOS e ODP sobre o estado do Ceará. *Revista de Geografia (UFPE)*, v. 29, n. 2, p. 114-135, 2012.

SILVA, ED. *Estudo da precipitação no estado de Minas Gerais – MG*. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) Universidade Federal de Itajubá, 2013. 69p.

SILVA, M. R.; JARDIM, C. H. Influência da Topografia e Uso da Terra na Variação dos Elementos Climáticos em Belo Horizonte, Ibirité, Sete Lagoas e Conceição do Mato Dentro - MG: O Segmento Temporal Entre 11 a 23/09/2016. *Revista do Departamento de Geografia*, p. 48-57, 2017.

SILVA, M. R.; OLIVEIRA, A. S.; JARDIM, C. H. Ocorrência de veranicos em belo Horizonte: o episódio de 23/12/2014 a 21/01/2015. *Anais...XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*. Campinas – SP, Unicamp, p. 2577-2581, 2017.

SIQUEIRA, A. H. B.; MOLION, L. C. B. Impactos dos ENOS no norte e nordeste brasileiro e sua relação com a Oscilação Decadal do Pacífico. *In: 59º REUNIÃO ANUAL DA SBPC*, 2007, BELÉM.

SMITH, S. V.; BULLOCK, S. H.; HINOJOSA-CORONA, A.; FRANCO-VIZCAÍNO, E.; ESCOTORODRÍGUEZ, M.; KRETZSCHMAR, T. G.; FARFÁN, L. M.; SALAZAR-CESEÑA, J. M. Soil erosion and significance for carbono fluxes on a mountainous mediterranean-climate watershed. *Ecological Applications*, v. 17, n. 5, p. 1379-1387, 2007.

SORRE, M. Objeto e método da climatologia. *Revista do Departamento de Geografia USP*, São Paulo, n 18, p. 89-94, 2006.

STRECK, N. A.; GALILEO, A. B.; ARNO, B. H.; FERNANDES, G.; PAULA, G. M. Associação da variabilidade da precipitação pluvial em Santa Maria com a Oscilação Decadal do Pacífico. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 44, n. 12, 2009.

TARIFA, J. R. *A análise topo e microclimática e o trabalho de campo: O caso de São José dos Campos*. Climatologia, São Paulo: Instituto de Geografia-USP, 1981, 13p.

TARIFA, J. R.; ARMANI, G. *Unidades climáticas da cidade de São Paulo: 1ª aproximação*. Atlas Ambiental do Município de São Paulo, Fase I: Diagnósticos e bases para a definição de políticas públicas para as áreas verdes no município de São Paulo. Universidade Federal de São Paulo - USP, 86f. 2000.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. *The water balance*. Publications in climatology, New jersey, Drexel Institute of Technology, 1955. 104p.

WERNECK, G. A BH das 200 enchentes. *Jornal Estado de Minas*, 07/01/2012. Disponível em: <https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2012/01/07/interna_gerais,271132/a-bh-das-200-enchentes.shtml>. Acesso em: maio de 2021.

WILLMOTT, C.J.; ROWE, C.M.; MINTZ, Y. Climatology of the terrestrial seasonal water cycle. *Journal of Climatology*, v. 5, p. 589-606, 1985.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION - WMO. *Sítio virtual da WMO, Perguntas Frequentes, Variabilidade Climática*. S.d. Disponível em: < <https://public.wmo.int/en/about-us/frequently-asked-questions>>. Acesso em: 4 de maio de 2018.

ZANDONADI, L. *As Chuvas na Bacia do Paraná: aspectos temporais, espaciais e rítmicos*. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UEP/IGCE, Rio Claro, São Paulo, 2009. 136 p.

APÊNDICES

APÊNDICE I

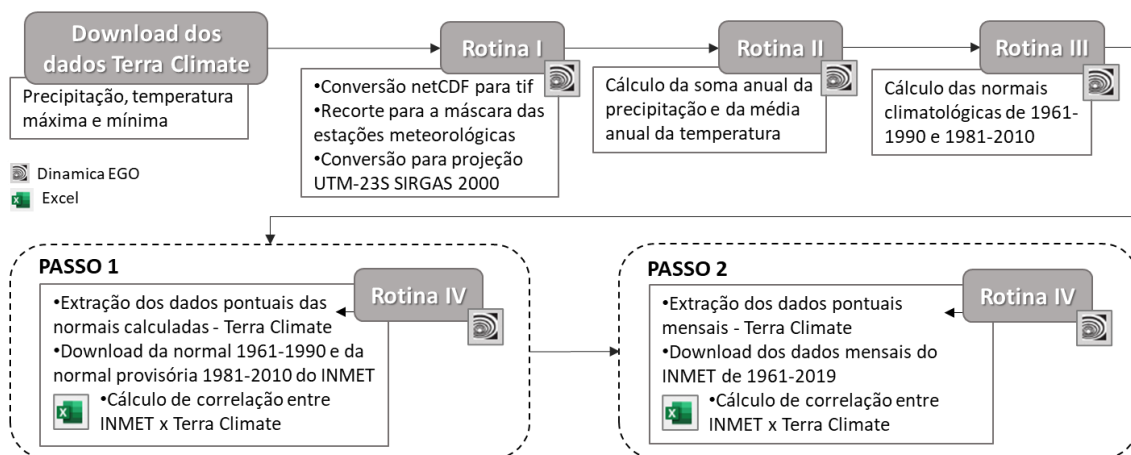


Figura A1: Roteiro de validação dos dados meteorológicos do projeto Terra Climate.

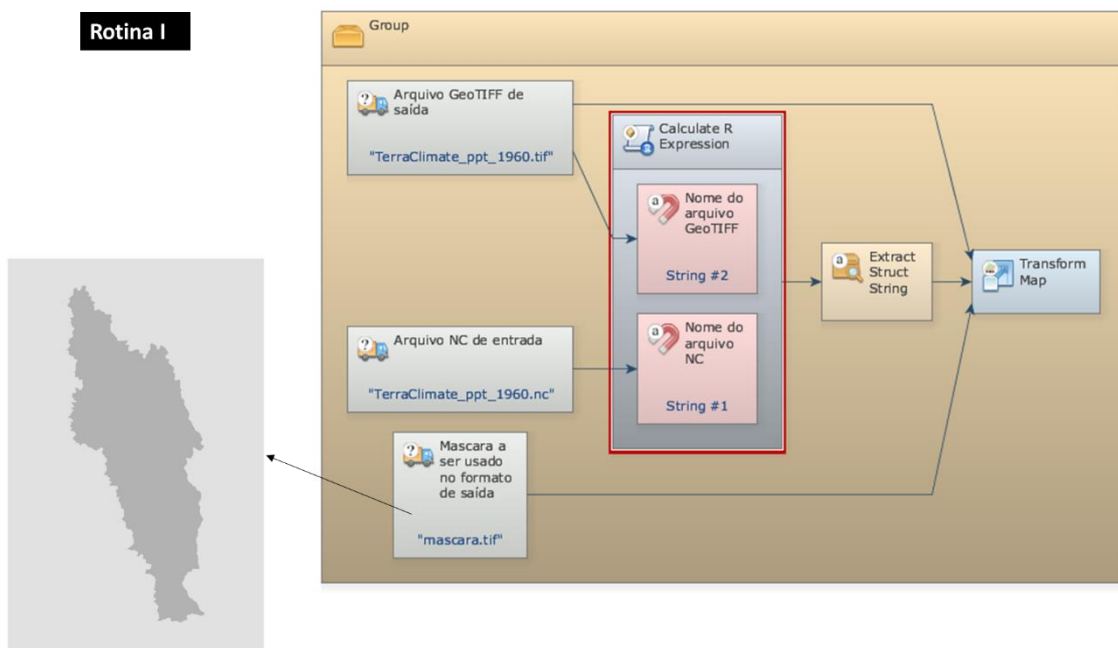


Figura A2: Rotina I - Conversão de formato netCDF para .tiff, recorte para máscara e conversão para projeção UTM.

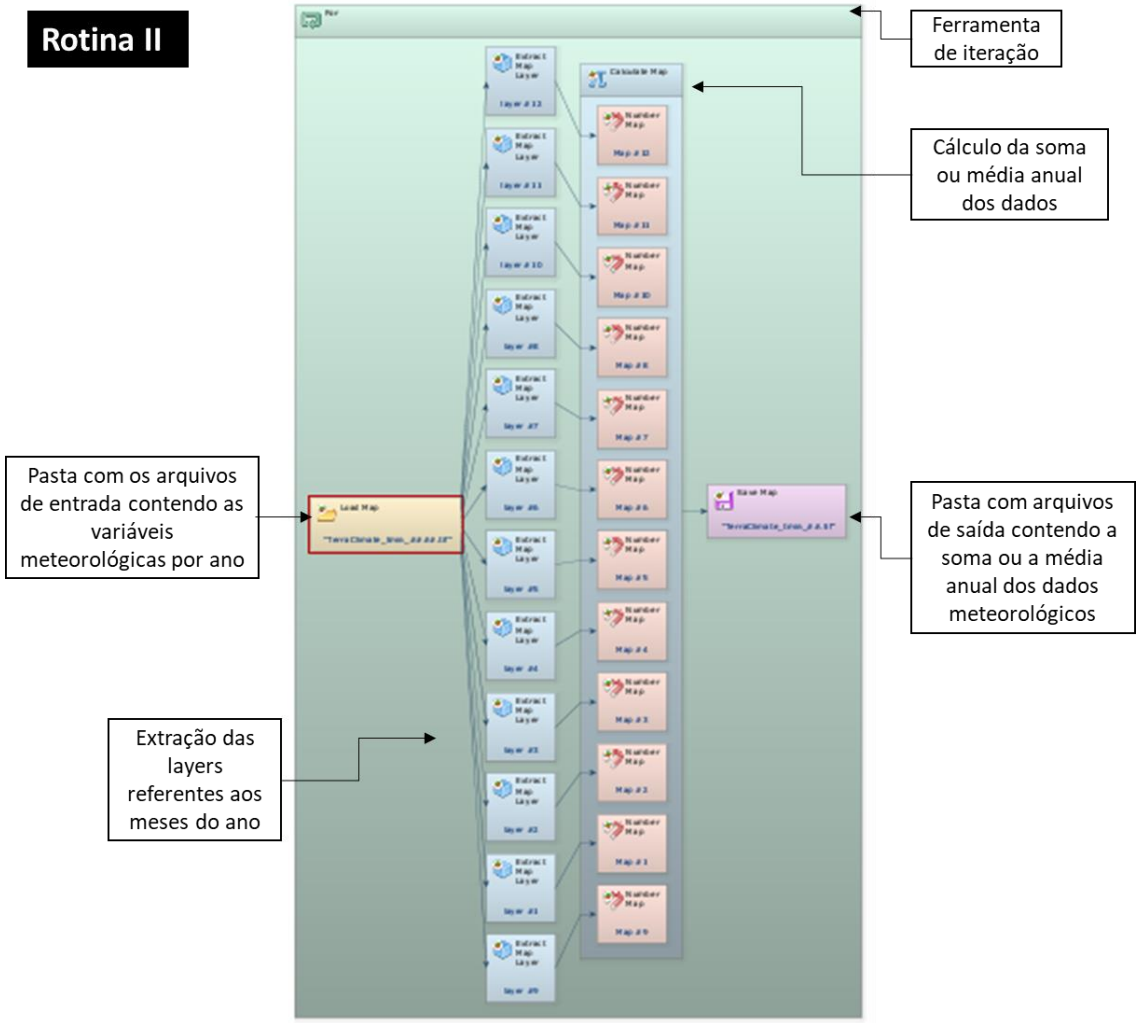


Figura A3: Rotina II – Cálculo da soma e média anual dos dados meteorológicos.

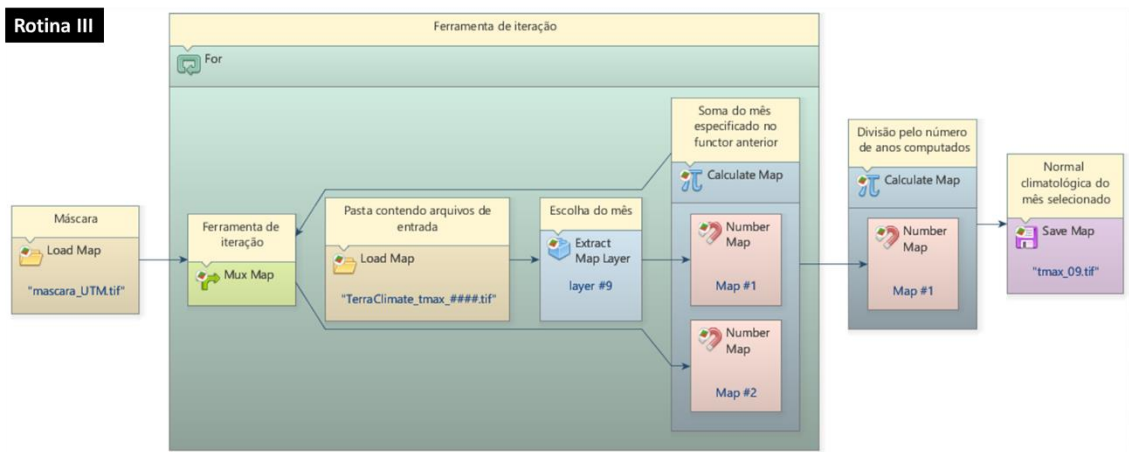


Figura A4: Rotina III – Cálculo das normais climatológicas de 1961-1990 e das normais provisórias de 1981- 2010.

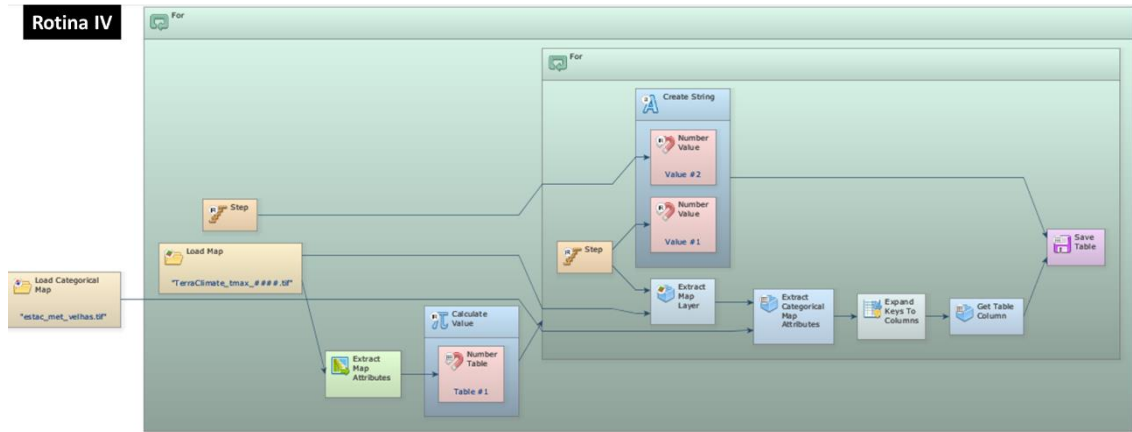


Figura A5: Rotina IV – Extração dos valores pontuais dos dados meteorológicos anuais e mensais.

APÊNDICE II

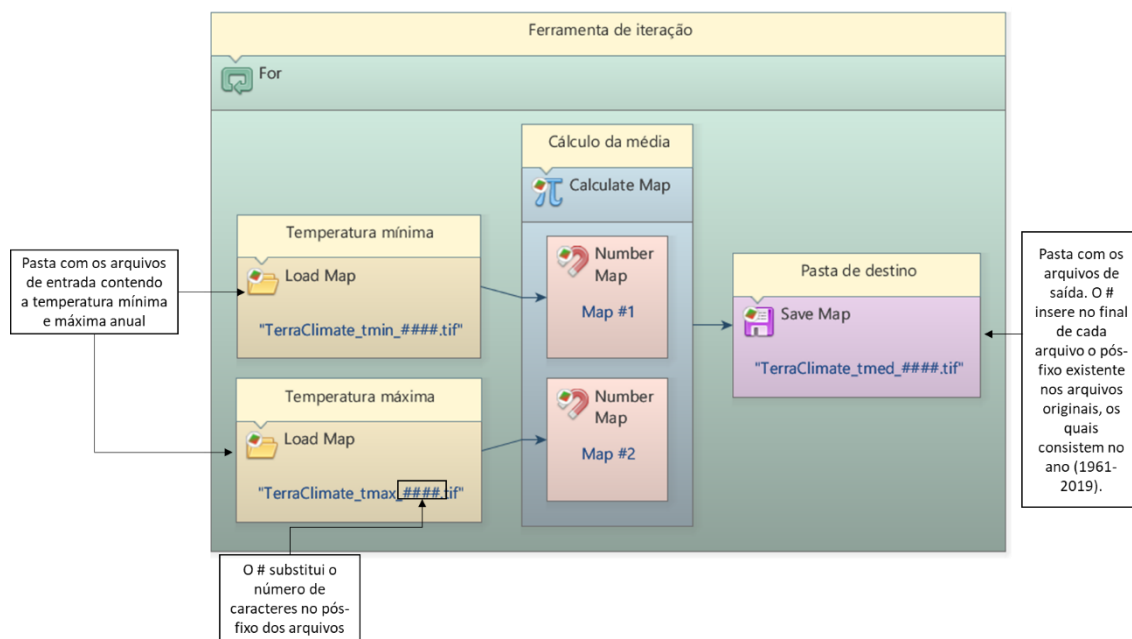


Figura A6: Modelo de cálculo da temperatura média do ar desenvolvido no software Dinamica EGO.

APÊNDICE III

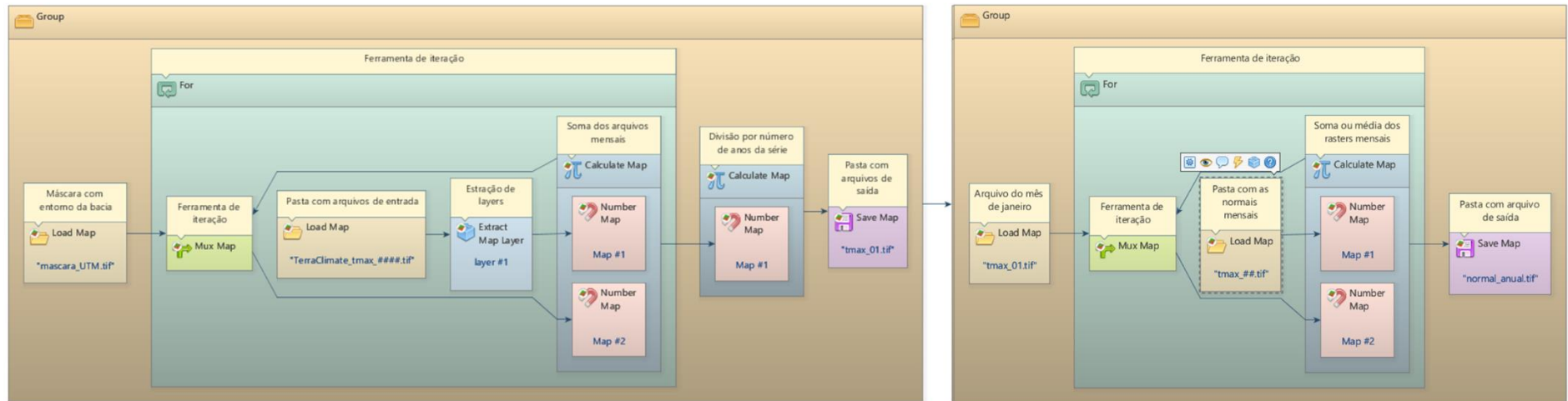
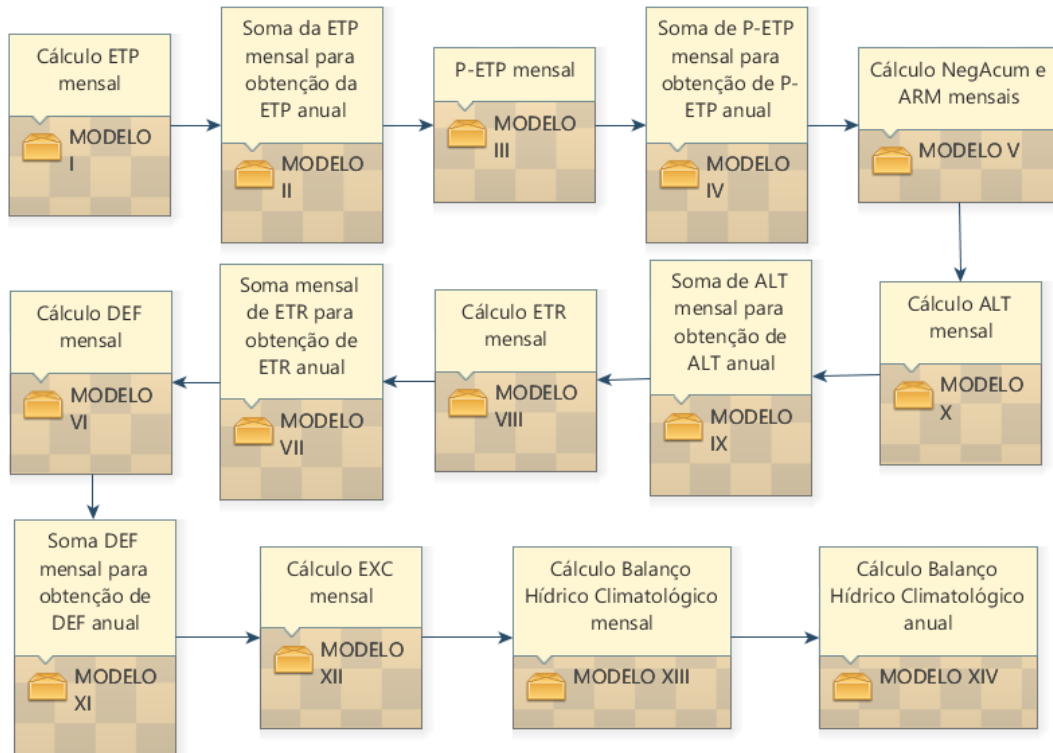


Figura A7: Modelo de cálculo das normais climatológicas mensais e anual.

APÊNDICE IV

O cálculo do Balanço Hídrico Climatológico foi feito por meio de modelos integrados em grupos, conforme a figura A8. Cada modelo calcula uma etapa do balanço de forma sequencial. As figuras A9 a A22 detalham cada um deles.



7 Modelo de cálculo do Balanço Hídrico Climatológico. Cada caixa representa um modelo que integra o cálculo do balanço.

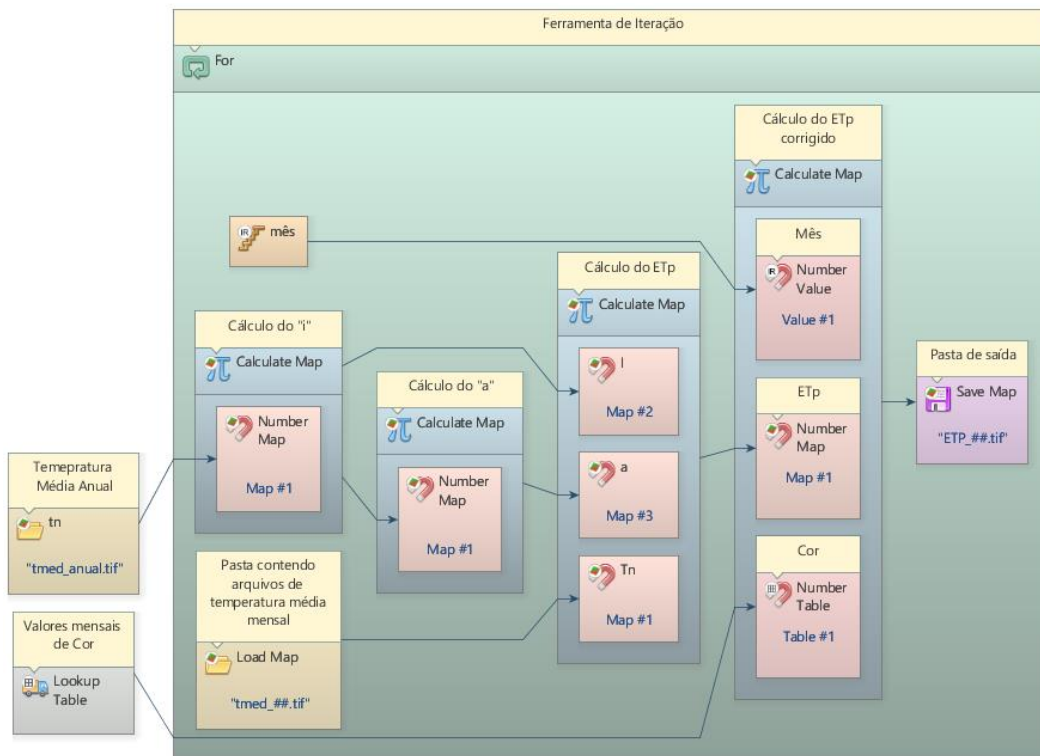


Figura A9: Modelo I - Cálculo da ETP.

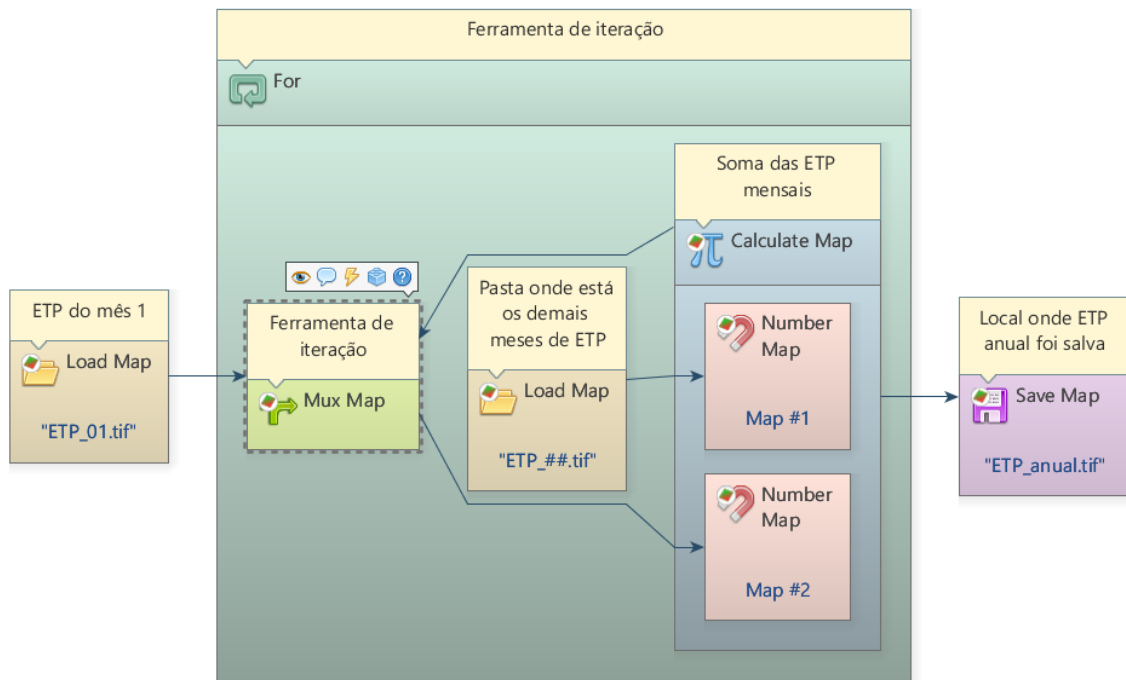


Figura A10: Modelo II - Soma da ETP mensal para obtenção da ETP anual.

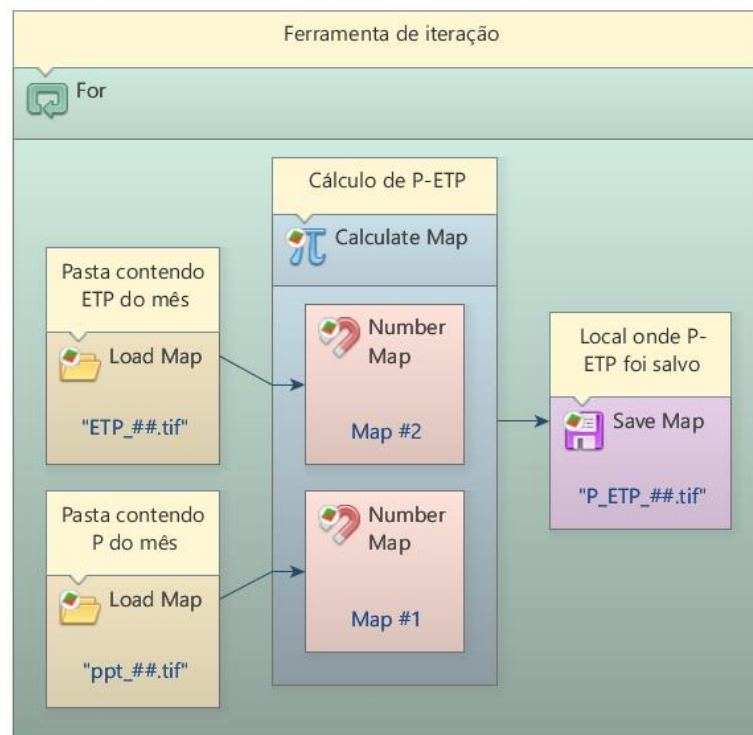


Figura A11: Modelo III - Cálculo P-ETP mensal.

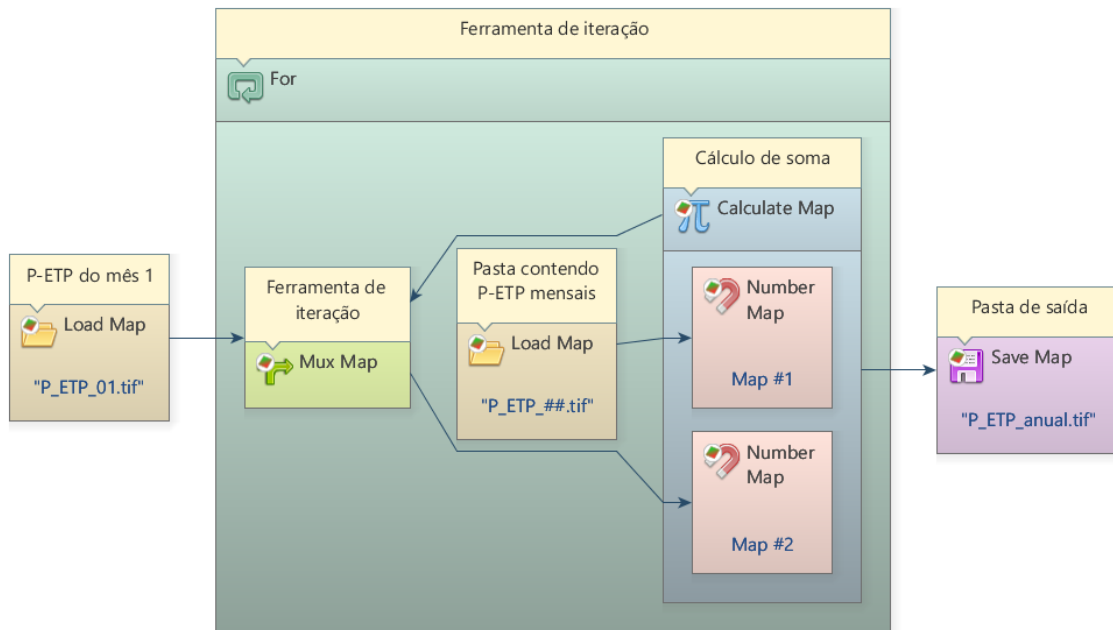


Figura A12: Modelo IV - Soma dos valores de P-ETP mensais para obtenção do saldo anual de P-ETP.

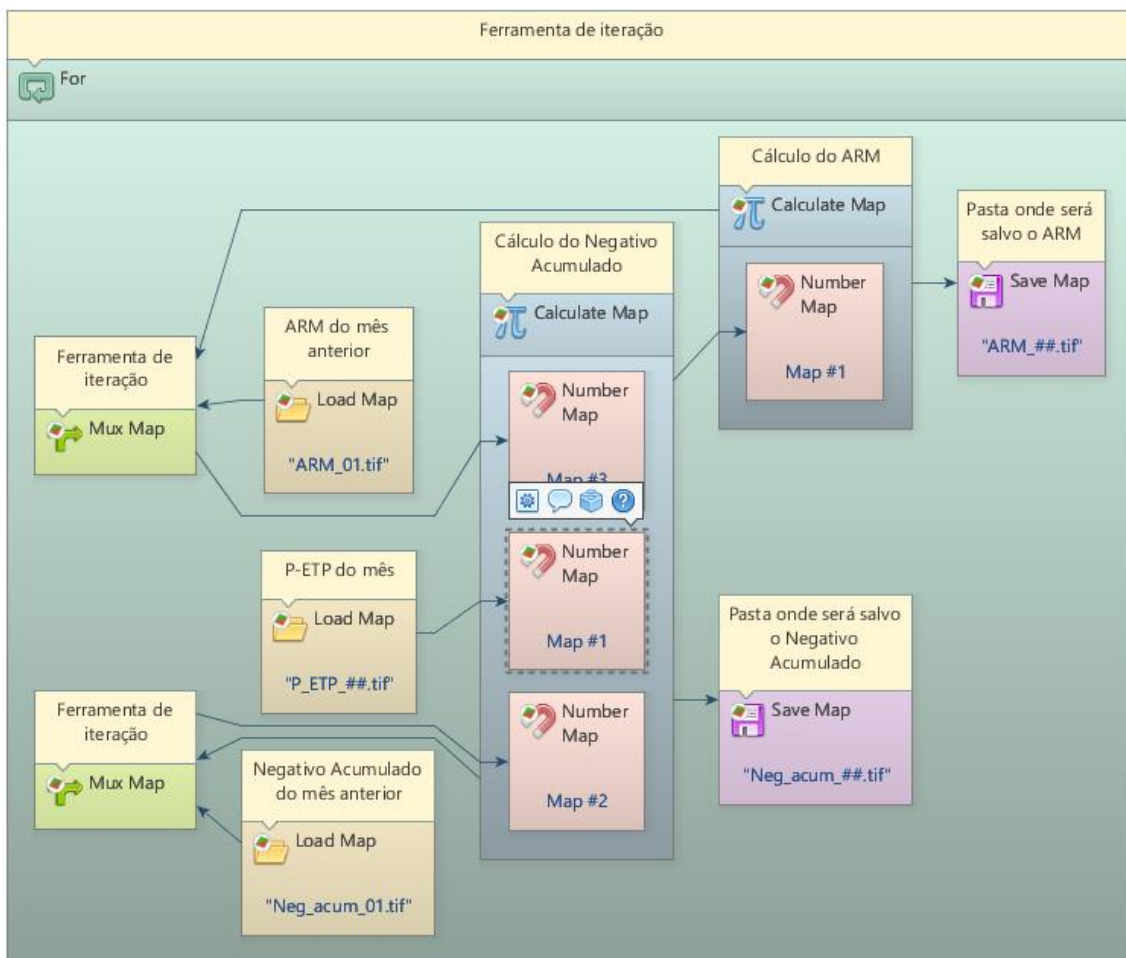


Figura A13: Modelo V - Cálculo do Negativo Acumulado (NegAcum) e do Armazenamento (ARM).

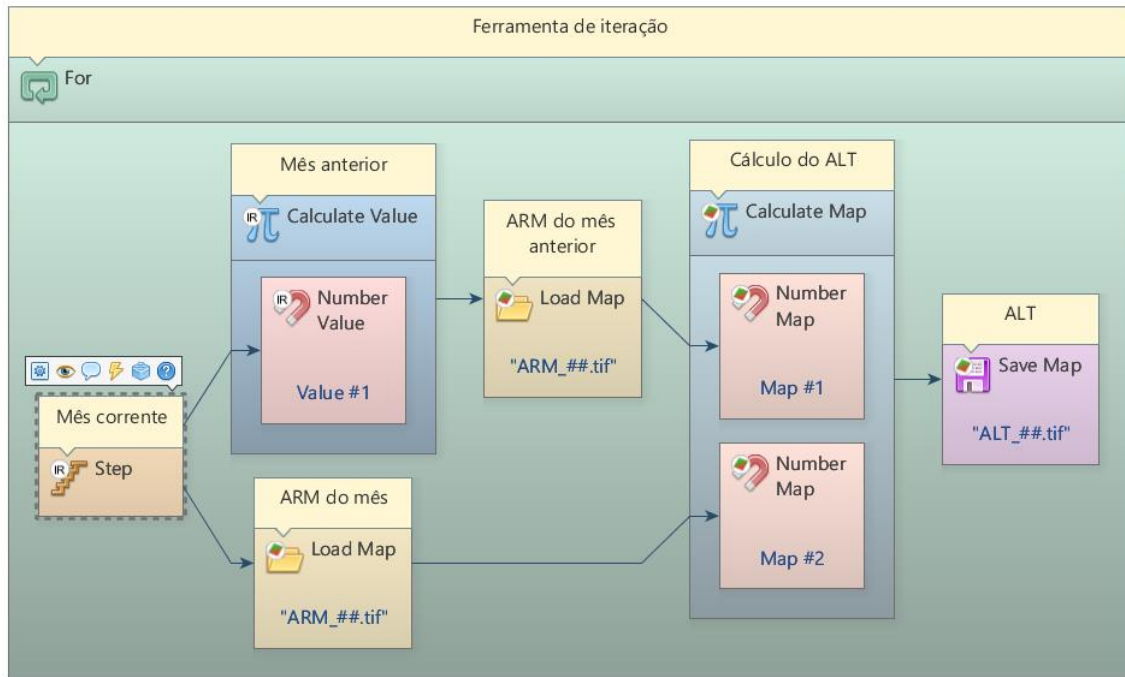


Figura A14: Modelo VI - Cálculo da Alteração (ALT) de água no solo.

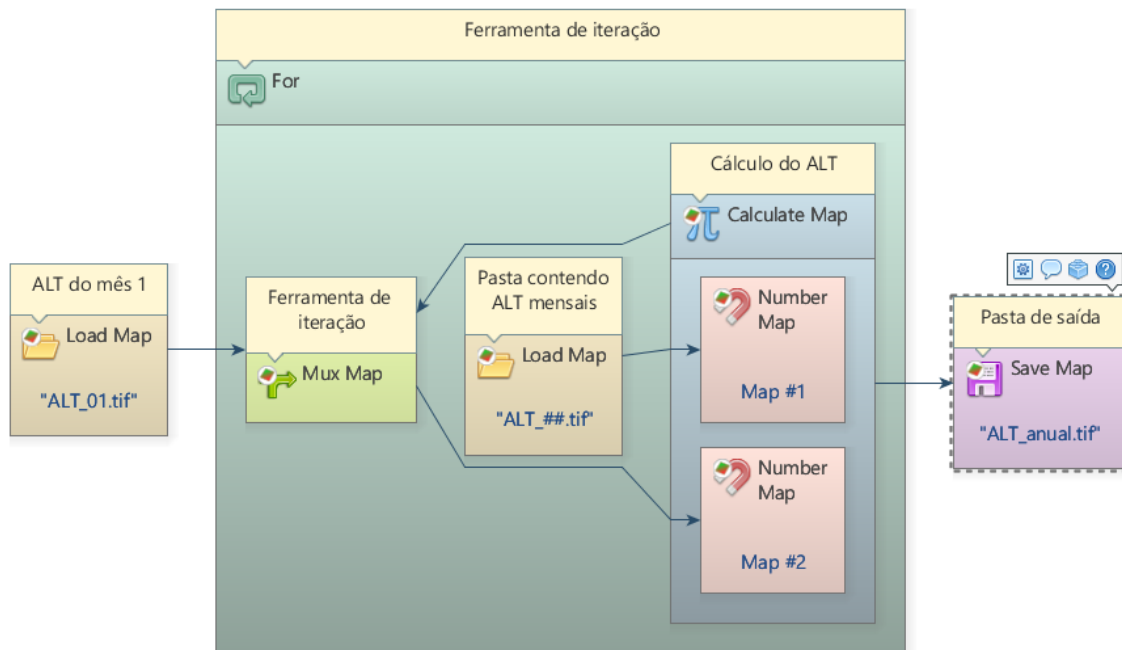


Figura A15: Modelo VII - Soma dos valores de ALT mensais para obtenção do saldo anual de ALT.

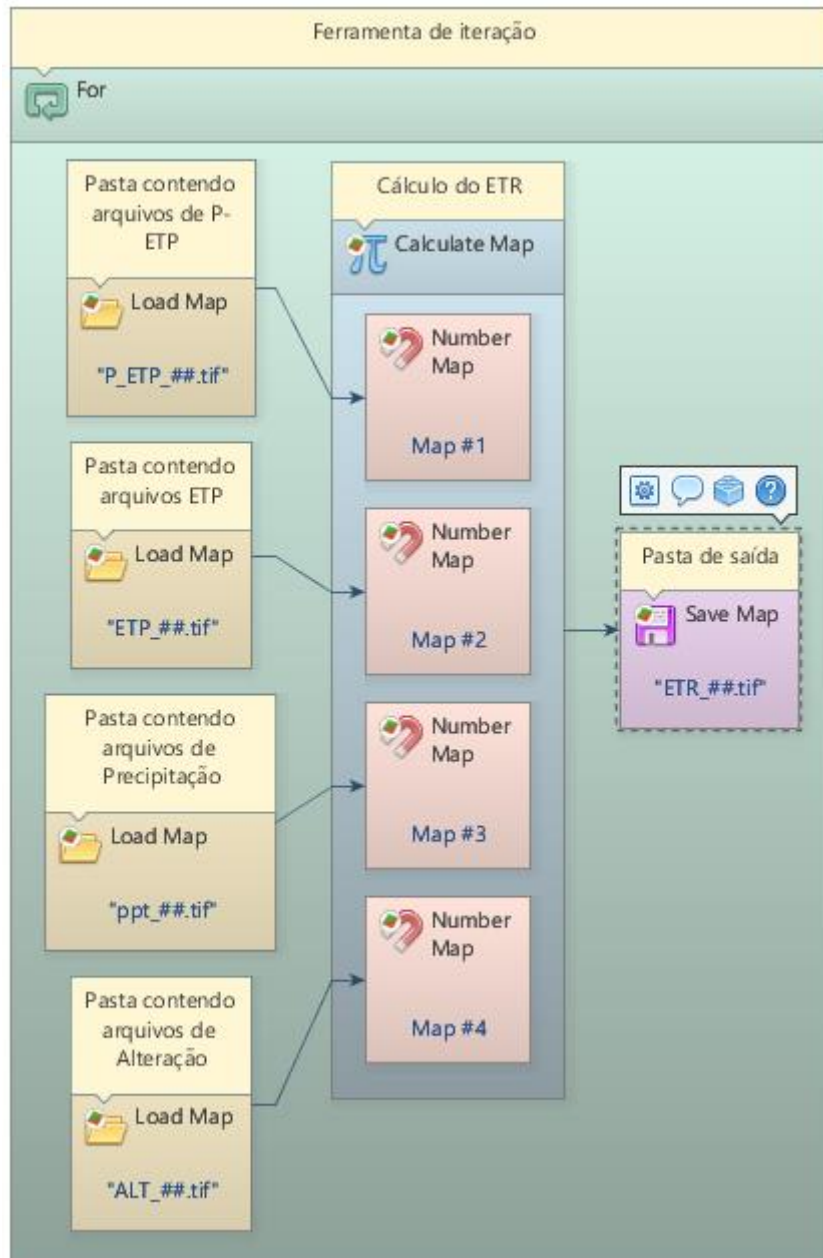


Figura A16: Modelo VIII - Cálculo da Evapotranspiração Real (ETR).

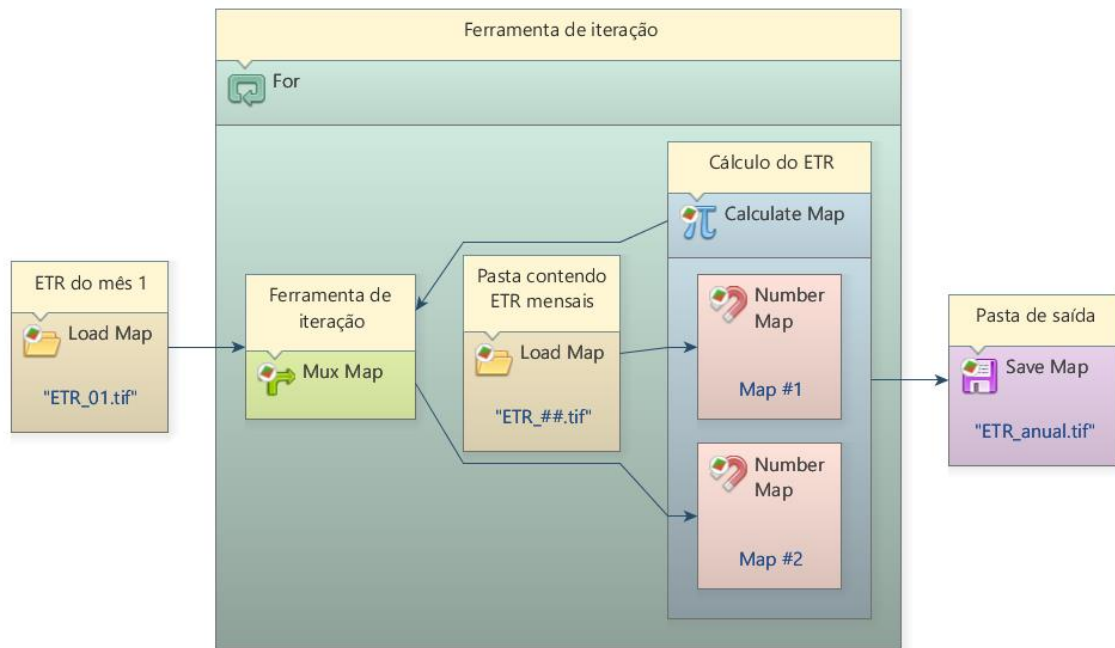


Figura A17: Modelo IX - Soma dos valores de ETR mensais para obtenção do saldo anual de ETR.

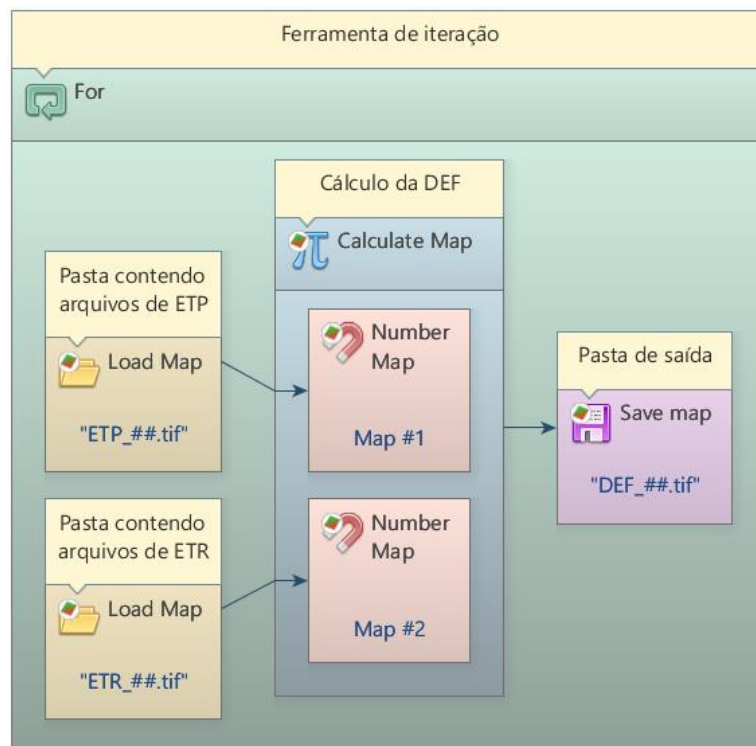


Figura A18: Modelo X - Cálculo da Deficiência (DEF).

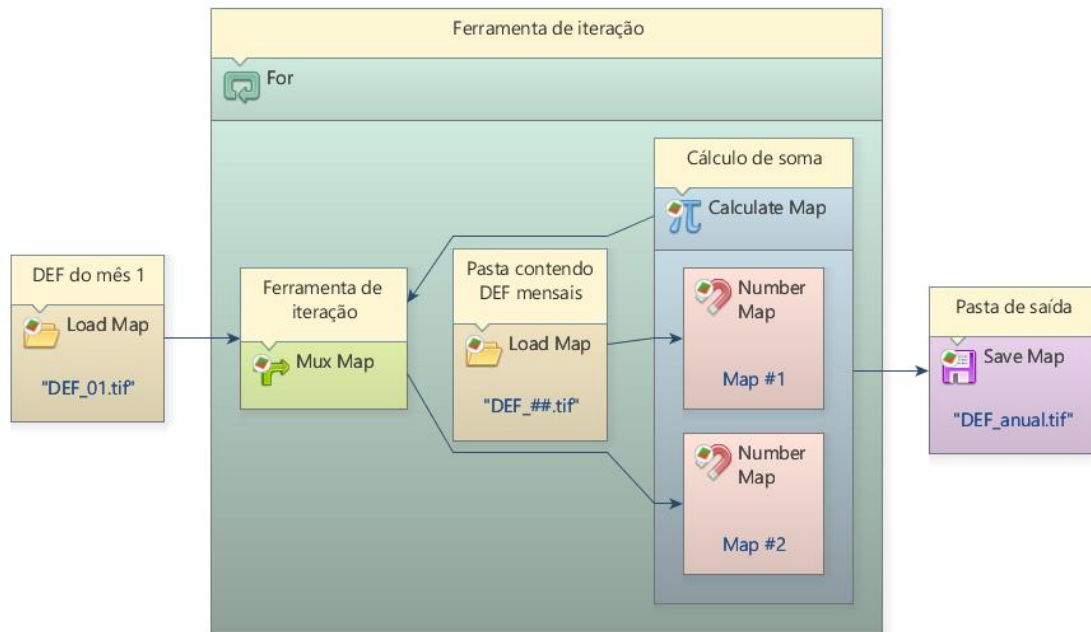


Figura A19: Modelo XI - Soma dos valores de DEF mensais para obtenção do saldo anual de DEF.

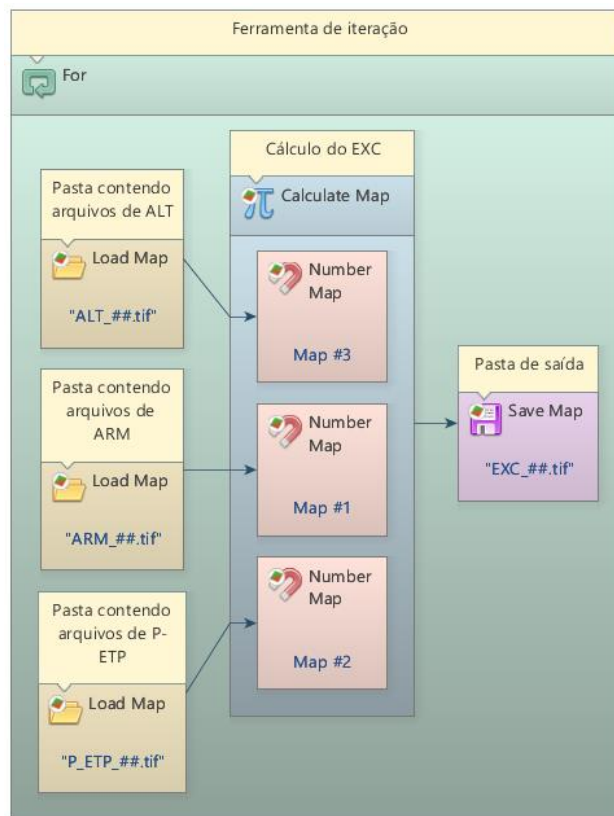


Figura A20: Modelo XII - Cálculo do Excedente (EXC).

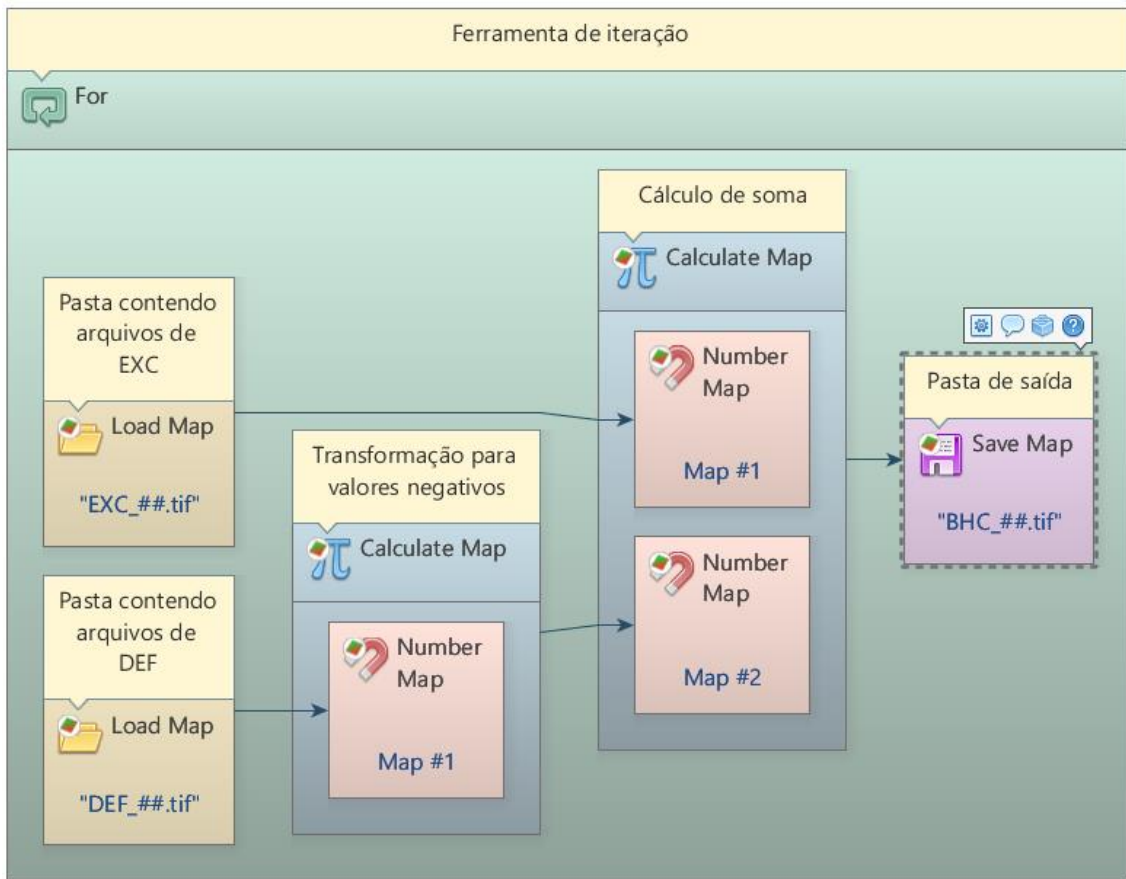


Figura A21: Modelo XIII - Cálculo do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) mensal.

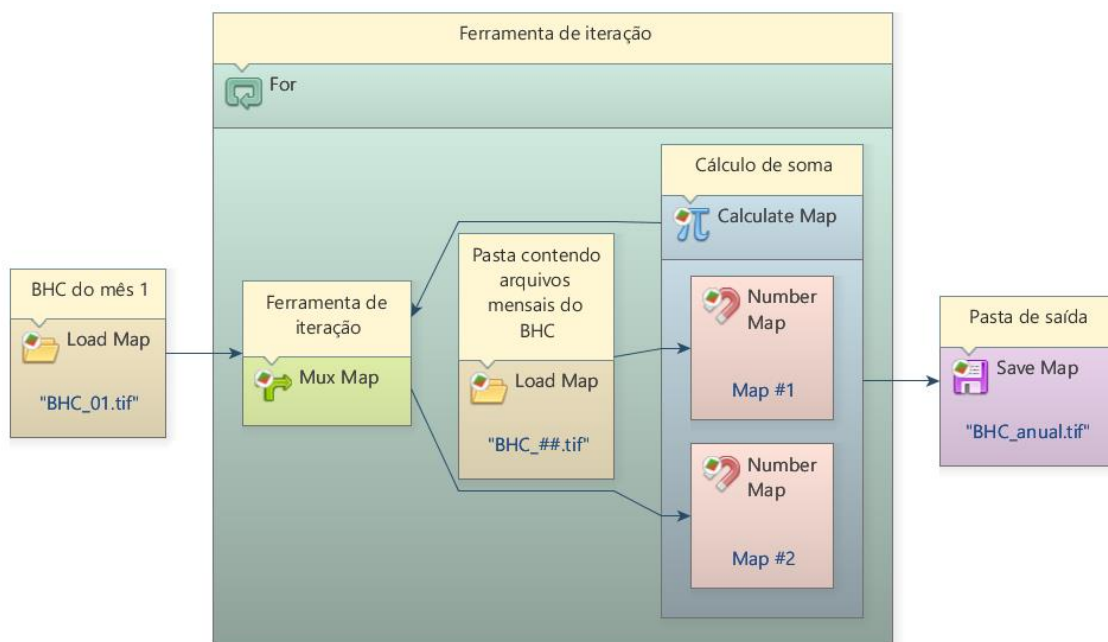
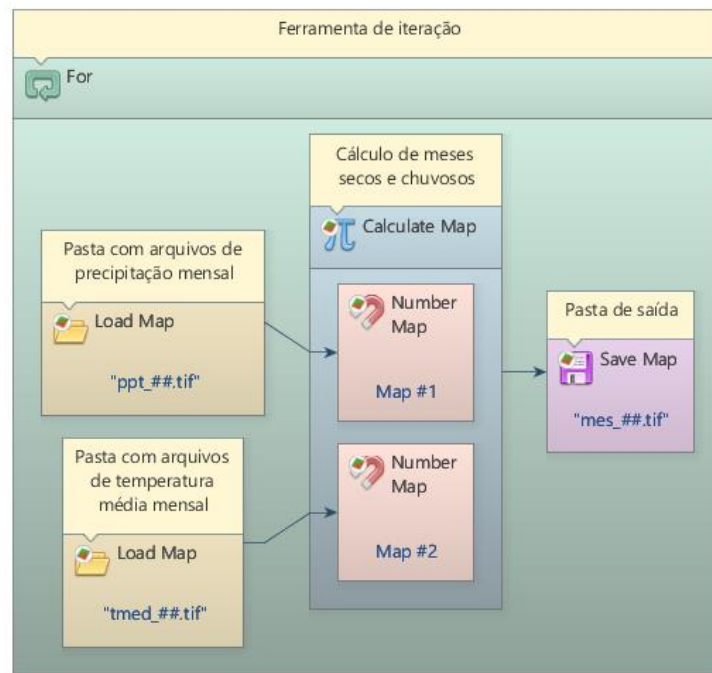


Figura A22: Modelo XIV - Soma dos valores de BHC mensais para obtenção do saldo anual do BHC.

APÊNDICE V



7 " Cálculo de meses secos e chuvosos.

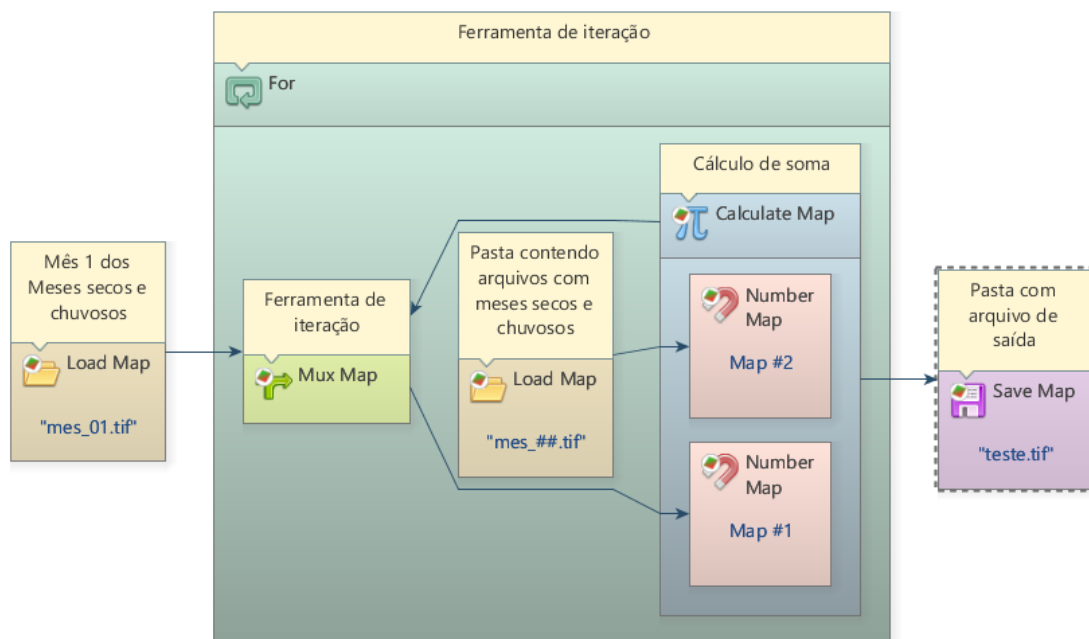
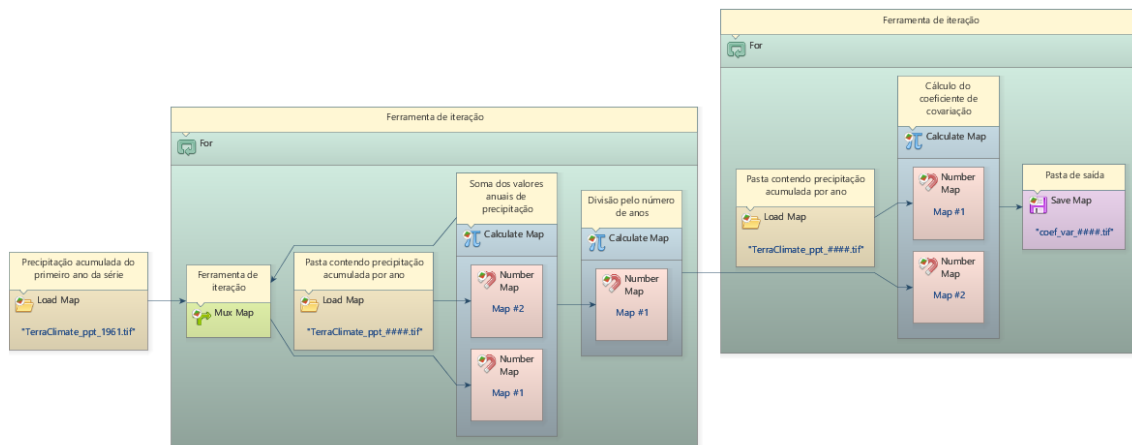


Figura A24: Soma dos meses secos para obtenção do total de meses secos no ano.

APÊNDICE VI



7 Modelo de cálculo do coeficiente de variação anual da precipitação.

APÊNDICE VII

u " Estatística básica dos clusters de 2 classes "

2 Classes		1	2
Altitude	Mínimo	569	453
	Máximo	1870	1325
	Amplitude	1301	872
	Média	1055	701
	Desvio padrão	198	140
BHC	Mínimo	184.4	-240.8
	Máximo	927.9	444.2
	Amplitude	743.6	685.0
	Média	553.2	57.3
	Desvio padrão	143.0	175.0
Precipitação	Mínimo	1049.5	878.3
	Máximo	1662.0	1403.0
	Amplitude	612.5	524.6
	Média	1417.2	1077.3
	Desvio padrão	121.7	129.1
Rugosidade	Mínimo	2.5	0.6
	Máximo	55.3	29.2
	Amplitude	52.8	28.6
	Média	15.6	7.3
	Desvio padrão	5.5	3.8
Radiação	Mínimo	2078.7	2278.7
	Máximo	2403.1	2450.1
	Amplitude	324.5	171.4
	Média	2258.0	2366.3
	Desvio padrão	69.6	29.3
Temp. Máxima	Mínimo	21.4	24.7
	Máximo	27.3	30.3
	Amplitude	5.9	5.6
	Média	24.8	28.0
	Desvio padrão	1.2	1.0
Temp. Média	Mínimo	15.7	18.8
	Máximo	21.1	23.3
	Amplitude	5.4	4.5
	Média	19.0	21.5
	Desvio padrão	1.0	0.8
Temp. Mínima	Mínimo	10.1	13.1
	Máximo	15.2	16.4
	Amplitude	5.1	3.3
	Média	13.1	15.0
	Desvio padrão	0.9	0.6
Vel. Ventos	Mínimo	0.54	0.50
	Máximo	1.25	0.93
	Amplitude	0.71	0.43
	Média	0.92	0.65
	Desvio padrão	0.12	0.09

u Estatística básica dos clusters de 3 classes

3 Classes		1	2	3
Altitude	Mínimo	644.0	558.0	453.0
	Máximo	1870.0	1420.0	1250.0
	Amplitude	1226.0	862.0	797.0
	Média	1138.5	850.8	660.4
	Desvio padrão	171.7	164.6	121.5
BHC	Mínimo	284.0	-87.1	-240.8
	Máximo	927.9	652.4	262.5
	Amplitude	643.9	739.5	503.3
	Média	634.7	335.4	-38.1
	Desvio padrão	109.2	118.9	118.5
Precipitação	Mínimo	1148.2	980.2	878.3
	Máximo	1662.0	1572.7	1213.6
	Amplitude	513.8	592.5	335.2
	Média	1469.4	1273.1	1009.6
	Desvio padrão	97.9	117.3	79.4
Rugosidade	Mínimo	3.0	1.3	0.6
	Máximo	55.3	34.0	29.2
	Amplitude	52.2	32.7	28.6
	Média	17.6	10.4	6.6
	Desvio padrão	5.3	4.1	3.8
Radiação	Mínimo	2078.7	2129.5	2332.2
	Máximo	2386.0	2427.8	2450.1
	Amplitude	307.3	298.3	117.9
	Média	2224.2	2328.5	2377.1
	Desvio padrão	59.6	41.8	23.3
Temp. Máxima	Mínimo	21.4	23.5	25.5
	Máximo	26.9	28.1	30.3
	Amplitude	5.5	4.6	4.8
	Média	24.2	26.5	28.4
	Desvio padrão	0.9	1.0	0.7
Temp. Média	Mínimo	15.7	17.9	19.1
	Máximo	20.7	21.6	23.3
	Amplitude	5.0	3.8	4.2
	Média	18.4	20.3	21.9
	Desvio padrão	0.7	0.7	0.6
Temp. Mínima	Mínimo	10.1	12.1	13.8
	Máximo	14.7	15.2	16.4
	Amplitude	4.6	3.1	2.7
	Média	12.6	14.2	15.3
	Desvio padrão	0.7	0.6	0.5
Vel. Ventos	Mínimo	0.6	0.5	0.5
	Máximo	1.3	1.0	0.9
	Amplitude	0.7	0.5	0.4
	Média	1.0	0.8	0.6
	Desvio padrão	0.1	0.1	0.1

u Estatística básica dos clusters de 4 classes

4 Classes		1	2	3	4
Altitude	Mínimo	644.0	573.0	558.0	453.0
	Máximo	1870.0	1564.0	1266.0	1285.0
	Amplitude	1226.0	991.0	708.0	832.0
	Média	1122.1	1132.7	770.6	670.0
	Desvio padrão	180.8	140.9	88.7	131.3
BHC	Mínimo	413.5	3.2	105.3	-240.8
	Máximo	927.9	699.0	640.7	262.5
	Amplitude	514.5	695.8	535.3	503.3
	Média	688.1	408.1	356.1	-36.5
	Desvio padrão	79.6	137.7	111.8	117.0
Precipitação	Mínimo	1343.2	986.2	1035.8	878.3
	Máximo	1662.0	1502.7	1572.7	1207.1
	Amplitude	318.7	516.4	536.9	328.8
	Média	1523.5	1258.8	1315.2	1008.5
	Desvio padrão	53.0	115.4	94.4	75.9
Rugosidade	Mínimo	4.9	2.2	1.3	0.6
	Máximo	55.3	34.0	28.9	29.2
	Amplitude	50.4	31.8	27.6	28.6
	Média	19.2	12.6	10.2	6.7
	Desvio padrão	4.9	5.0	3.7	3.8
Radiação	Mínimo	2078.7	2157.0	2124.2	2324.5
	Máximo	2347.2	2427.8	2408.0	2450.1
	Amplitude	268.5	270.8	283.8	125.7
	Média	2197.5	2321.5	2317.3	2377.1
	Desvio padrão	44.8	56.4	37.0	23.3
Temp. Máxima	Mínimo	21.4	22.7	24.5	25.5
	Máximo	26.8	27.2	28.0	30.3
	Amplitude	5.4	4.5	3.5	4.8
	Média	24.3	24.5	26.9	28.4
	Desvio padrão	0.9	0.8	0.6	0.8
Temp. Média	Mínimo	15.7	17.5	18.5	19.1
	Máximo	20.7	21.0	21.5	23.3
	Amplitude	5.0	3.5	2.9	4.2
	Média	18.4	18.8	20.7	21.8
	Desvio padrão	0.8	0.6	0.4	0.7
Temp. Mínima	Mínimo	10.1	11.8	12.6	13.6
	Máximo	14.7	14.9	15.2	16.4
	Amplitude	4.6	3.1	2.6	2.8
	Média	12.5	13.1	14.4	15.2
	Desvio padrão	0.8	0.4	0.4	0.5
Vel. Ventos	Mínimo	0.6	0.5	0.5	0.5
	Máximo	1.3	1.0	1.0	0.9
	Amplitude	0.6	0.4	0.5	0.4
	Média	1.0	0.9	0.7	0.6
	Desvio padrão	0.1	0.1	0.1	0.1

u Estatística básica dos clusters de 5 classes

5 Classes		1	2	3	4	5
Altitude	Mínimo	647.0	573.0	569.0	532.0	453.0
	Máximo	1870.0	1564.0	1267.0	1287.0	1250.0
	Amplitude	1223.0	991.0	698.0	755.0	797.0
	Média	1133.5	1142.0	802.8	740.8	617.1
	Desvio padrão	177.0	135.6	86.5	125.4	102.0
BHC	Mínimo	413.5	3.2	229.9	-195.6	-240.8
	Máximo	927.9	699.0	677.0	338.2	198.8
	Amplitude	514.5	695.8	447.1	533.8	439.5
	Média	695.7	424.9	425.0	130.8	-119.7
	Desvio padrão	76.3	128.6	85.5	89.5	73.0
Precipitação	Mínimo	1343.2	1015.3	1213.6	918.5	878.3
	Máximo	1662.0	1502.7	1576.6	1299.9	1063.4
	Amplitude	318.7	487.4	363.0	381.4	185.1
	Média	1527.9	1271.6	1370.4	1122.7	957.7
	Desvio padrão	51.1	109.9	70.8	84.4	38.6
Rugosidade	Mínimo	4.9	2.4	1.4	0.7	0.6
	Máximo	55.3	34.0	30.1	29.2	23.4
	Amplitude	50.4	31.6	28.7	28.5	22.8
	Média	19.3	12.8	11.6	7.8	6.1
	Desvio padrão	5.0	4.9	3.9	3.6	3.8
Radiação	Mínimo	2078.7	2167.9	2096.4	2305.8	2336.9
	Máximo	2338.9	2414.0	2384.1	2432.6	2450.1
	Amplitude	260.2	246.1	287.7	126.8	113.2
	Média	2194.9	2316.0	2299.8	2358.8	2386.9
	Desvio padrão	43.3	56.9	39.0	20.7	21.2
Temp. Máxima	Mínimo	21.4	22.7	24.5	24.8	27.2
	Máximo	26.5	26.9	27.5	28.9	30.3
	Amplitude	5.1	4.1	3.0	4.0	3.1
	Média	24.2	24.4	26.6	27.6	28.8
	Desvio padrão	0.9	0.7	0.5	0.5	0.6
Temp. Média	Mínimo	15.7	17.5	18.5	19.1	19.7
	Máximo	20.3	21.0	21.2	22.3	23.3
	Amplitude	4.6	3.5	2.6	3.2	3.6
	Média	18.3	18.7	20.5	21.1	22.2
	Desvio padrão	0.8	0.5	0.5	0.4	0.5
Temp. Mínima	Mínimo	10.1	11.8	12.6	13.4	14.5
	Máximo	14.4	14.7	15.2	15.8	16.4
	Amplitude	4.3	2.8	2.6	2.4	1.9
	Média	12.4	13.0	14.3	14.7	15.6
	Desvio padrão	0.7	0.4	0.5	0.3	0.4
Vel. Ventos	Mínimo	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5
	Máximo	1.3	1.0	1.0	0.9	0.9
	Amplitude	0.6	0.4	0.5	0.4	0.4
	Média	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6
	Desvio padrão	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

u Estatística básica dos clusters de 6 classes

6 Classes		1	2	3	4	5	6
Altitude	Mínimo	647.0	588.0	569.0	535.0	563.0	453.0
	Máximo	1870.0	1564.0	1325.0	1002.0	1325.0	1143.0
	Amplitude	1223.0	976.0	756.0	467.0	762.0	690.0
	Média	1145.4	1157.5	830.2	694.5	933.2	612.1
	Desvio padrão	174.3	130.4	85.7	59.3	137.2	88.7
BHC	Mínimo	468.7	96.9	263.6	-79.3	-205.8	-240.8
	Máximo	927.9	699.0	727.4	433.5	413.3	262.5
	Amplitude	459.3	602.1	463.8	512.8	619.1	503.3
	Média	706.3	466.1	461.8	199.1	94.4	-108.4
	Desvio padrão	71.3	104.8	78.9	94.1	92.8	81.7
Precipitação	Mínimo	1367.2	1033.4	1236.6	980.4	883.7	878.3
	Máximo	1662.0	1502.7	1590.6	1343.6	1276.0	1131.8
	Amplitude	294.7	469.2	354.1	363.2	392.3	253.4
	Média	1534.8	1305.6	1396.0	1193.5	1044.9	966.1
	Desvio padrão	47.2	93.1	67.8	77.3	56.5	46.9
Rugosidade	Mínimo	4.9	2.7	3.1	0.7	1.1	0.6
	Máximo	55.3	34.0	32.5	29.2	30.4	23.4
	Amplitude	50.4	31.3	29.4	28.5	29.4	22.8
	Média	19.5	13.4	13.0	7.7	9.1	5.9
	Desvio padrão	5.0	4.7	4.2	2.9	4.7	3.6
Radiação	Mínimo	2078.7	2150.4	2087.9	2294.1	2248.9	2336.9
	Máximo	2332.3	2403.1	2384.1	2396.6	2433.2	2450.1
	Amplitude	253.7	252.8	296.2	102.5	184.3	113.2
	Média	2192.6	2301.0	2288.7	2345.3	2379.3	2384.5
	Desvio padrão	42.2	55.7	46.6	18.6	22.8	21.1
Temp. Máxima	Mínimo	21.4	22.7	24.0	25.1	24.5	26.5
	Máximo	26.8	26.5	27.4	28.7	29.1	30.3
	Amplitude	5.4	3.8	3.5	3.6	4.5	3.8
	Média	24.1	24.2	26.4	27.6	26.8	28.8
	Desvio padrão	0.9	0.6	0.5	0.4	0.9	0.6
Temp. Média	Mínimo	15.7	17.5	18.2	19.2	18.8	19.1
	Máximo	20.8	20.4	21.1	22.1	22.6	23.3
	Amplitude	5.0	2.9	3.0	2.9	3.8	4.2
	Média	18.2	18.6	20.3	21.2	20.6	22.2
	Desvio padrão	0.8	0.4	0.5	0.3	0.7	0.5
Temp. Mínima	Mínimo	10.1	11.8	12.3	13.2	13.0	14.1
	Máximo	14.8	14.2	15.2	15.4	15.8	16.4
	Amplitude	4.7	2.4	2.9	2.2	2.9	2.3
	Média	12.4	12.9	14.2	14.7	14.3	15.6
	Desvio padrão	0.7	0.4	0.5	0.2	0.5	0.4
Vel. Ventos	Mínimo	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	Máximo	1.3	1.0	1.0	0.8	0.9	0.8
	Amplitude	0.6	0.4	0.5	0.3	0.4	0.3
	Média	1.0	0.9	0.8	0.6	0.8	0.6
	Desvio padrão	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

u " Estatística básica dos clusters de 9 classes "

9 Classes		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Altitude	Mínimo	738.0	643.0	616.0	573.0	584.0	552.0	516.0	545.0	453.0
	Máximo	1870.0	1646.0	1564.0	1314.0	1490.0	1036.0	881.0	1287.0	1007.0
	Amplitude	1132.0	1003.0	948.0	741.0	906.0	484.0	365.0	742.0	554.0
	Média	1227.4	984.4	1165.2	826.1	1111.5	708.5	628.6	842.5	580.8
	Desvio padrão	153.4	132.2	134.1	79.7	116.3	54.9	50.5	117.8	77.6
BHC	Mínimo	583.4	412.4	320.9	263.6	3.2	115.9	-205.8	-205.8	-240.8
	Máximo	927.9	784.4	778.9	677.0	508.5	479.6	262.5	273.2	17.0
	Amplitude	344.6	372.0	457.9	413.4	505.3	363.7	468.3	479.0	257.8
	Média	754.2	624.1	528.4	453.0	276.7	268.4	19.9	30.1	-176.6
	Desvio padrão	50.7	55.1	78.6	67.5	89.7	64.0	77.0	87.3	41.3
Precipitação	Mínimo	1437.0	1281.1	1194.6	1236.6	1002.7	1114.6	910.9	878.3	878.3
	Máximo	1662.0	1611.0	1571.8	1576.6	1340.4	1368.0	1190.5	1165.8	994.9
	Amplitude	225.0	329.9	377.2	340.0	337.7	253.4	279.6	287.4	116.6
	Média	1560.1	1496.7	1361.4	1391.2	1146.0	1248.3	1052.9	1019.9	932.6
	Desvio padrão	38.4	42.8	69.3	63.1	68.2	53.4	63.5	60.7	17.8
Rugosidade	Mínimo	4.9	6.4	3.0	3.1	2.2	1.3	0.7	1.1	0.6
	Máximo	54.6	55.3	31.8	28.1	34.0	27.7	17.8	29.2	23.2
	Amplitude	49.7	48.9	28.7	25.0	31.8	26.4	17.1	28.1	22.6
	Média	19.5	19.9	13.9	12.5	10.8	8.0	5.9	9.8	5.2
	Desvio padrão	5.4	4.2	4.3	3.5	4.9	2.6	2.4	4.5	3.6
Radiação	Mínimo	2078.7	2078.7	2148.3	2124.2	2226.5	2176.8	2334.4	2324.5	2355.6
	Máximo	2321.2	2345.4	2382.2	2384.1	2427.8	2384.1	2410.3	2447.9	2450.1
	Amplitude	242.5	266.7	234.0	259.9	201.3	207.3	75.8	123.4	94.6
	Média	2183.8	2209.4	2270.3	2296.6	2372.5	2337.5	2364.8	2375.2	2396.0
	Desvio padrão	37.3	50.3	48.5	36.7	25.2	19.6	12.0	25.2	20.5
Temp. Máxima	Mínimo	21.4	23.2	22.7	24.5	23.5	24.6	25.5	25.4	27.9
	Máximo	25.4	26.8	26.4	27.3	26.9	28.2	29.0	29.2	30.3
	Amplitude	4.0	3.5	3.6	2.8	3.5	3.6	3.5	3.8	2.4
	Média	23.6	25.1	24.1	26.4	25.0	27.3	28.3	27.6	29.3
	Desvio padrão	0.6	0.6	0.6	0.4	0.7	0.4	0.3	0.6	0.5
Temp. Média	Mínimo	15.7	17.5	17.3	18.5	18.0	18.7	19.1	19.1	21.0
	Máximo	19.2	20.7	20.1	21.1	21.0	21.6	22.4	22.6	23.3
	Amplitude	3.4	3.3	2.8	2.6	3.0	2.8	3.3	3.5	2.3
	Média	17.7	19.2	18.4	20.4	19.2	21.0	21.7	21.1	22.6
	Desvio padrão	0.5	0.5	0.4	0.4	0.5	0.3	0.3	0.5	0.4
Temp. Mínima	Mínimo	10.1	11.7	11.6	12.6	12.6	12.8	13.8	13.6	14.8
	Máximo	13.4	14.7	14.0	15.2	14.7	15.0	15.8	15.9	16.4
	Amplitude	3.4	3.0	2.4	2.6	2.0	2.2	2.0	2.4	1.6
	Média	11.9	13.2	12.7	14.3	13.4	14.6	15.1	14.7	15.9
	Desvio padrão	0.5	0.5	0.3	0.5	0.3	0.2	0.2	0.4	0.3
Vel. Ventos	Mínimo	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	Máximo	1.3	1.2	1.0	1.0	0.9	0.8	0.8	0.9	0.8
	Amplitude	0.5	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3
	Média	1.1	1.0	0.9	0.8	0.8	0.7	0.6	0.7	0.6
	Desvio padrão	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1

u Estatística básica dos clusters de 10 classes

10 Classes		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Altitude	Mínimo	695.0	647.0	603.0	569.0	586.0	564.0	534.0	499.0	563.0	453.0
	Máximo	1870.0	1646.0	1564.0	1301.0	1490.0	1226.0	947.0	1143.0	1287.0	827.0
	Amplitude	1175.0	999.0	961.0	732.0	904.0	662.0	413.0	644.0	724.0	374.0
	Média	1247.3	999.6	1170.4	832.8	1119.9	728.3	669.5	651.2	890.7	554.1
	Desvio padrão	147.9	129.2	134.5	83.9	114.7	56.7	55.0	86.1	118.6	53.7
BHC	Mínimo	575.5	440.2	229.9	229.9	3.2	138.4	-136.8	-226.6	-205.8	-240.8
	Máximo	927.9	893.8	796.2	689.4	567.4	453.0	290.7	262.5	345.7	-23.9
	Amplitude	352.4	453.6	566.3	459.5	564.2	314.6	427.5	489.1	551.5	216.9
	Média	760.8	641.2	544.3	465.6	313.0	306.1	124.2	-60.6	64.4	-188.1
	Desvio padrão	48.3	50.7	67.2	63.8	88.2	50.1	56.3	55.0	76.3	34.7
Precipitação	Mínimo	1450.9	1351.1	1194.6	1213.6	1002.7	1131.2	980.4	878.3	883.7	878.3
	Máximo	1662.0	1638.9	1580.3	1576.6	1389.4	1382.3	1266.1	1094.3	1192.3	978.1
	Amplitude	211.1	287.8	385.7	363.0	386.7	251.1	285.8	216.0	308.7	99.7
	Média	1563.6	1506.9	1374.9	1400.5	1176.0	1277.9	1134.9	985.4	1033.5	930.6
	Desvio padrão	37.2	37.7	60.9	60.9	73.4	42.5	45.9	42.3	54.0	16.5
Rugosidade	Mínimo	4.9	5.0	3.0	3.1	2.4	1.3	0.7	1.7	1.1	0.7
	Máximo	55.3	51.3	36.4	30.2	34.0	27.8	29.2	23.4	29.2	17.9
	Amplitude	50.4	46.3	33.3	27.1	31.6	26.4	28.5	21.7	28.1	17.3
	Média	20.1	19.1	14.6	12.9	11.2	8.6	7.2	7.2	9.2	4.1
	Desvio padrão	5.6	4.1	4.5	3.7	4.8	2.8	3.0	3.6	4.6	2.7
Radiação	Mínimo	2078.7	2078.7	2150.4	2096.4	2226.5	2278.7	2322.1	2336.9	2324.5	2356.7
	Máximo	2329.8	2344.9	2382.2	2384.1	2414.0	2384.1	2396.6	2450.1	2433.2	2450.1
	Amplitude	251.1	266.2	231.9	287.7	187.5	105.4	74.5	113.2	108.8	93.4
	Média	2182.3	2205.6	2270.2	2290.4	2354.1	2329.7	2355.7	2376.3	2376.7	2397.9
	Desvio padrão	38.6	45.8	49.7	42.5	43.6	19.0	11.6	16.3	25.1	20.2
Temp. Máxima	Mínimo	21.4	21.8	22.7	23.7	23.5	24.9	26.1	26.9	24.4	27.5
	Máximo	25.8	26.8	27.4	27.4	27.2	28.0	28.7	30.0	29.1	30.3
	Amplitude	4.4	5.0	4.7	3.7	3.8	3.1	2.6	3.1	4.6	2.8
	Média	23.5	25.0	24.0	26.4	24.9	27.2	28.0	28.4	27.2	29.4
	Desvio padrão	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6	0.3	0.3	0.4	0.6	0.5
Temp. Média	Mínimo	15.7	16.1	17.2	17.9	18.0	19.0	19.9	19.1	18.8	21.3
	Máximo	19.8	20.7	21.0	21.1	21.0	21.3	22.2	23.0	22.6	23.3
	Amplitude	4.1	4.6	3.8	3.2	3.0	2.3	2.4	3.9	3.8	2.0
	Média	17.7	19.1	18.3	20.3	19.1	20.8	21.4	21.9	20.9	22.7
	Desvio padrão	0.5	0.5	0.4	0.5	0.4	0.2	0.2	0.3	0.5	0.4
Temp. Mínima	Mínimo	10.1	10.4	11.5	12.1	12.4	13.1	13.9	14.4	13.1	15.0
	Máximo	13.8	14.7	14.6	15.2	14.7	15.1	15.4	16.1	15.8	16.4
	Amplitude	3.7	4.3	3.1	3.1	2.3	2.0	1.5	1.7	2.8	1.4
	Média	11.8	13.1	12.7	14.2	13.3	14.5	14.8	15.3	14.5	16.0
	Desvio padrão	0.4	0.5	0.3	0.5	0.3	0.3	0.2	0.2	0.4	0.2
Vel. Ventos	Mínimo	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	Máximo	1.3	1.2	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	0.8
	Amplitude	0.6	0.5	0.4	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3
	Média	1.1	1.0	0.9	0.8	0.8	0.7	0.6	0.6	0.7	0.6
	Desvio padrão	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1

APÊNDICE VIII

Anos padrão na bacia hidrográfica do rio das Velhas de 1961 a 1990

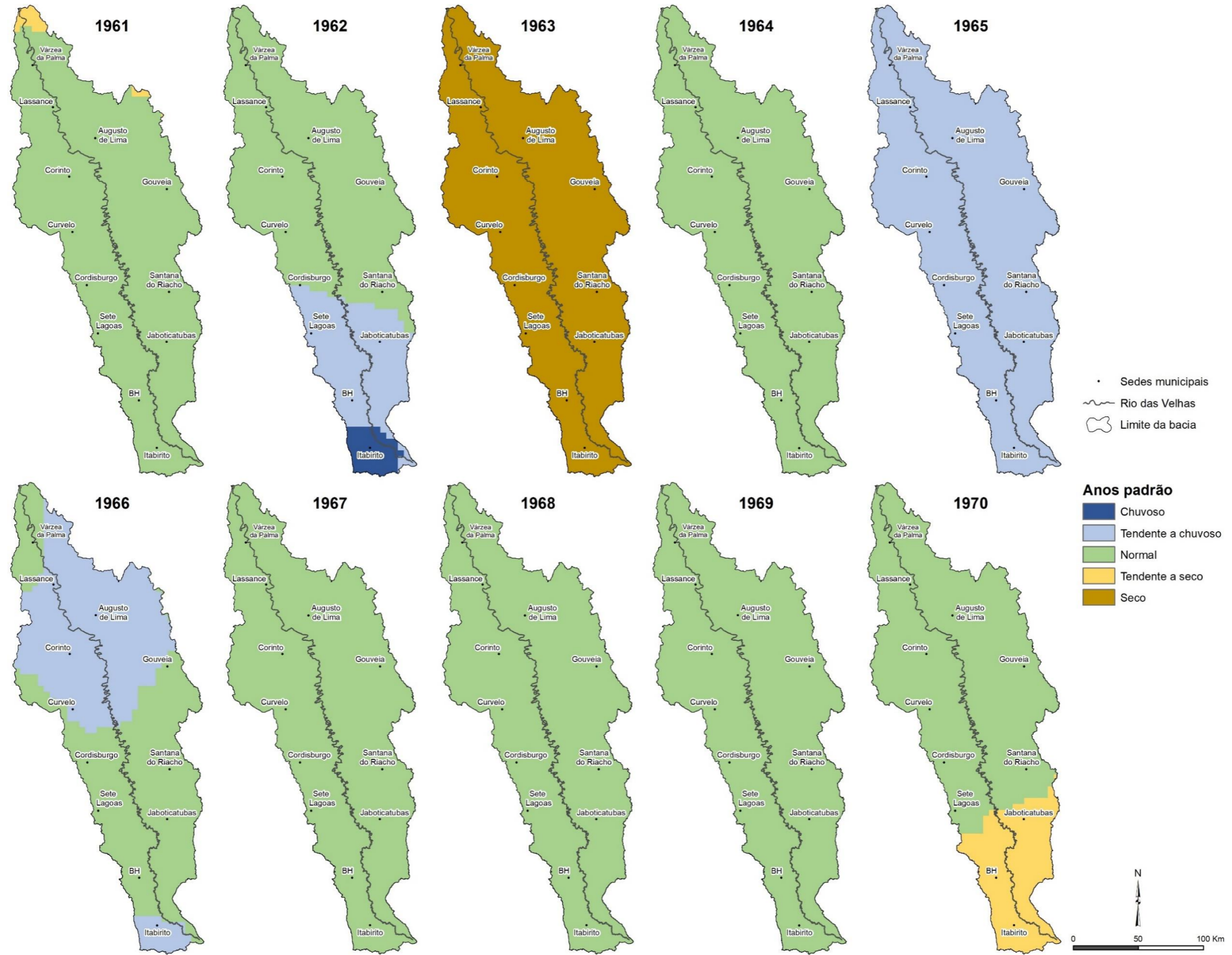


Figura A26: Anos padrão na bacia hidrográfica do rio das Velhas de 1961 a 1970.

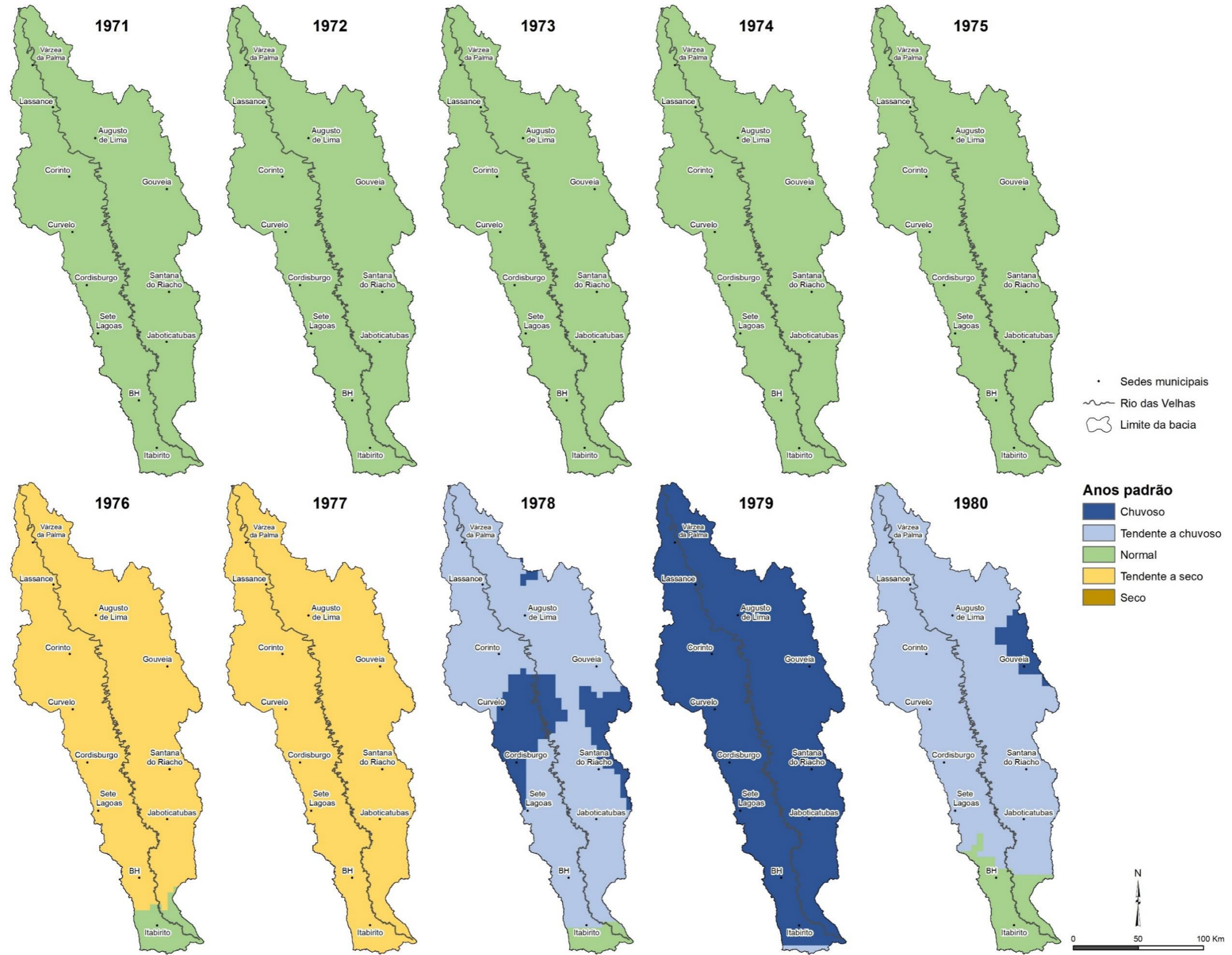


Figura A27: Anos padrão na bacia hidrográfica do rio das Velhas de 1971 a 1980.

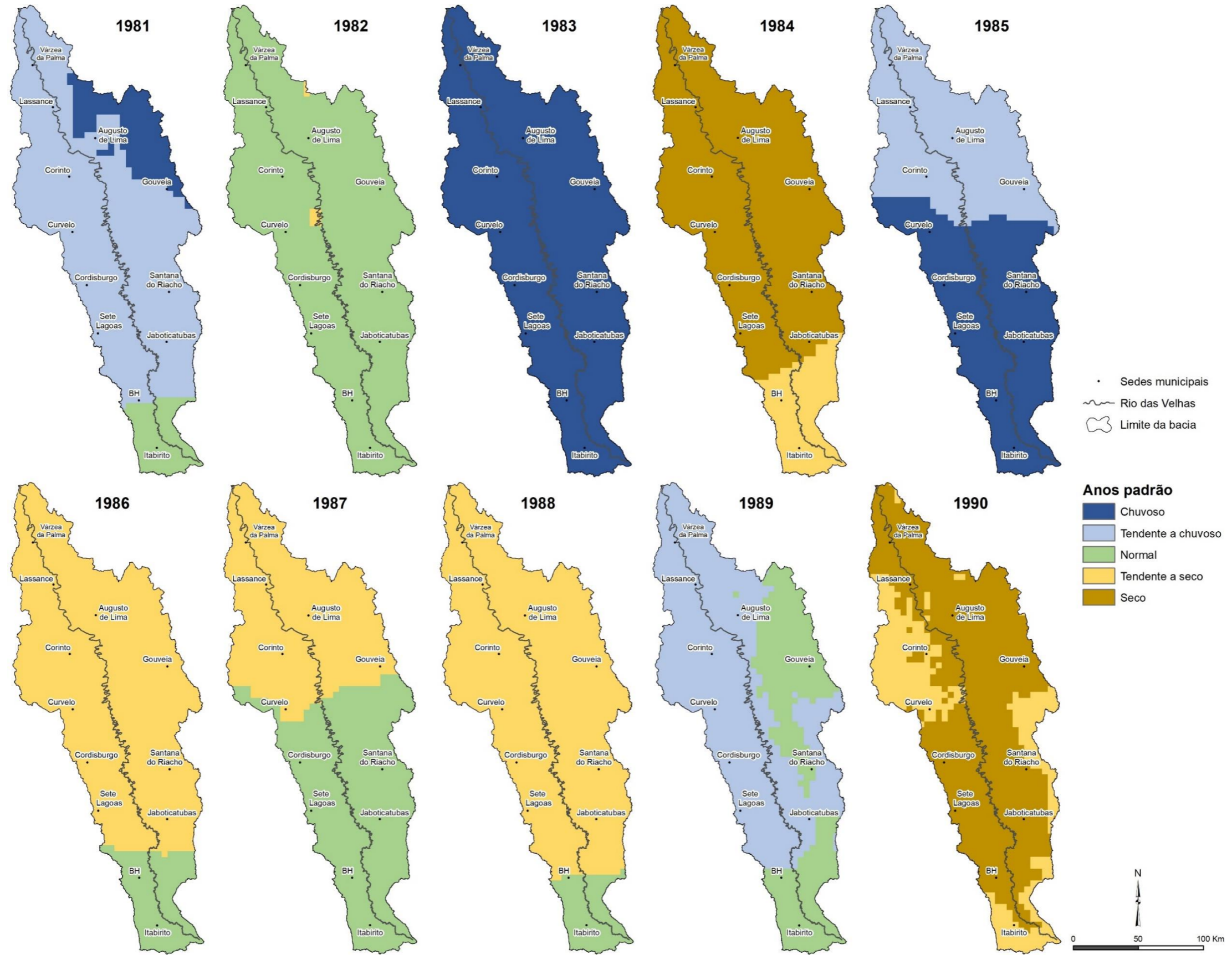


Figura A28: Anos padrão na bacia hidrográfica do rio das Velhas de 1981 a 1991.

APÊNDICE IX

Análise da influência de fenômenos ENOS e ODP sobre a precipitação na bacia hidrográfica do rio das Velhas no período de 1961-1990

Contextualização: Este tópico tem como objetivo analisar a possível influência de fenômenos climáticos de larga escala sobre a precipitação na bacia hidrográfica do Rio das Velhas. Essa análise auxilia na caracterização do regime pluviométrico da bacia.

Para realizá-la foram utilizados dados da temperatura da superfície do mar (TSM)¹⁴ disponibilizados pela National Oceanic and Atmospheric Administration (NOOA), os quais indicam, por trimestre, os períodos em que se configuraram eventos El Niño (TSM>0,5) e La Niña (TSM<-0,5) e períodos neutros, e dados do Índice da Oscilação Decadal do Pacífico (ODP Index)¹⁵ gerados também pela NOAA e que indicam as fases quentes e frias da ODP. Os dados de precipitação da bacia foram obtidos do projeto TerraClimate e extraídos os valores mensais de 1961-2019 de dois municípios em pontos extremos da bacia sendo eles Itabirito, na alta bacia, e Várzea da Palma, no baixo Velhas. Esses dados foram introduzidos no software Excel onde foi calculada a média trimestral a fim de se comparar com os dados da TSM e da ODP. Assim, foram calculadas as médias de precipitação por trimestre na fase quente e fria da ODP, sob eventos de El Niño, La Niña e períodos neutros, e as médias trimestrais nos fenômenos ENOS sob as fases quentes e frias da ODP.

Por fim, os dados de ODP e ENOS foram comparados com os anos padrão calculados para a bacia segundo a metodologia de Monteiro (1973). Como foi identificado que o período seco do ano (Abril-Setembro) não apresentou alterações significativas para o total anual da precipitação independentemente do tipo de ano padrão e de evento ENOS ou fase da ODP, foram eliminados dessa análise os trimestres de AMJ a ASO. Assim, somente os trimestres mais chuvosos foram utilizados para contabilizar o número de trimestres sob efeito do El Niño/La Niña nas fases da ODP em cada tipo de ano padrão. Esta análise teve o objetivo de identificar se há um padrão nítido de efeitos da combinação do ENOS e ODP sobre a precipitação anual na bacia hidrográfica do rio das Velhas.

¹⁴

Disponível

em:

<https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php>.

¹⁵ Disponível em: <<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/pacific-decadal-oscillation-pdo-definition-and-indices>>.

Os resultados são apresentados a seguir. Os anos padrão calculados para a bacia no mesmo período também foram sobrepostos aos eventos de tele conexões analisados a fim de verificar possível relação entre eles.

Resultados:

Durante o período de 1961-2019 foram estabelecidas três fases da ODP: uma fase fria de 1961-1976; uma fase quente de 1977-1997; e uma fase fria de 1998-2019, mas que perdura atualmente (2021) (Figura A29). Durante esses períodos, a precipitação média trimestral nos municípios de Itabirito e Várzea da Palma não apresentaram diferenças expressivas entre as fases quente e fria da ODP (Figura A30), principalmente nos trimestres mais secos do ano (MJJ-SON).

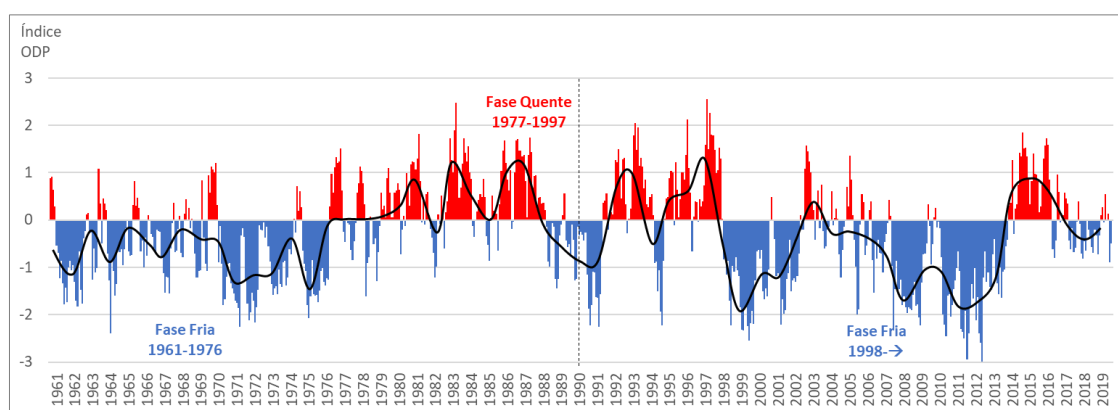


Figura A29: Fases da Oscilação Decadal do Pacífico no período de 1961 a 2019

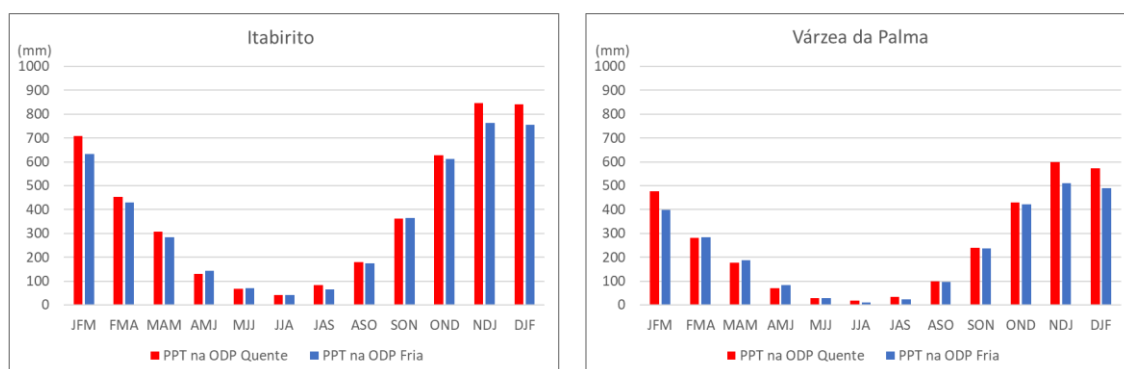


Figura A30: Precipitação média trimestral na fase quente e fria da ODP nos municípios de Itabirito e Várzea da Palma no período de 1961-2019.

No entanto, é possível observar um sinal de que os trimestres mais chuvosos do ano (OND a JFM) apresentam maior precipitação na fase quente da ODP. Concomitantemente, esta é a condição que apresenta maior desvio padrão da precipitação trimestral, o que é um indicício de que a precipitação é mais variável no período chuvoso na fase quente da ODP (Tabela A9).

Tabela A9: Desvio padrão da precipitação trimestral nas fases quente e fria da ODP.

Trimestres	Fase Fria da ODP (mm)	Fase Quente da ODP (mm)
JFM	208,0	265,2
FMA	139,9	150,0
MAM	123,8	99,7
AMJ	94,6	40,2
MJJ	55,0	32,4
JJA	29,9	28,8
JAS	49,4	41,5
ASO	111,6	69,0
SON	154,4	111,5
OND	209,3	131,7
NDJ	224,5	180,1
DJF	233,6	199,2

A ODP e a TSM apresentam uma relação direta, onde o índice positivo da ODP tende a influenciar TSM positiva e vice-versa (FiguraA31). Essa relação não é uma correlação perfeita, uma vez que acontecem eventos opostos em que a ODP é positiva/negativa e a TSM é negativa/positiva, assim como se estabelecem eventos El Niño e La Niña em ambas as fases da ODP. No entanto, como aponta Andreoli e Kayano (2005), existe uma tendência de que na fase quente da ODP ocorra maior número de eventos El Niño do que La Niña, e mais intensos do que aqueles que ocorrem na fase fria. Molion (2005) postulou que a ODP estaria em uma nova fase fria a partir de 1999 que perduraria até 2025 e que nesse período seria menor a ocorrência de eventos La Niña. Atualmente (2021), a fase fria da ODP ainda se estende e até 2019 o número de eventos La Niña superou o El Niño, com a ocorrência de apenas um evento de grande intensidade do El Niño entre os anos de 2014 e 2016 (Figura).

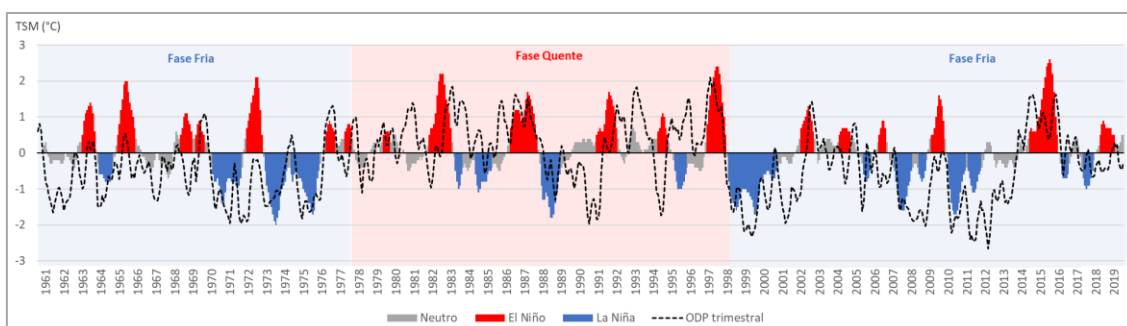


Figura A31: Índice ODP e TSM trimestrais de 1961-2019, e a configuração de eventos ENOS e fases frias e quentes da ODP.

A média de precipitação ocorrida sob influência dos eventos ENOS apontou que os períodos neutros apresentam maior precipitação nos primeiros trimestres do ano (JFM

a AMJ) em relação aos períodos de El Niño e La Niña (Figura). A precipitação no primeiro trimestre do ano chega a ser 28% e 33% menor no El Niño em Itabirito e Várzea da Palma, respectivamente, e 41% e 49% nos períodos de La Niña (Tabela A10).

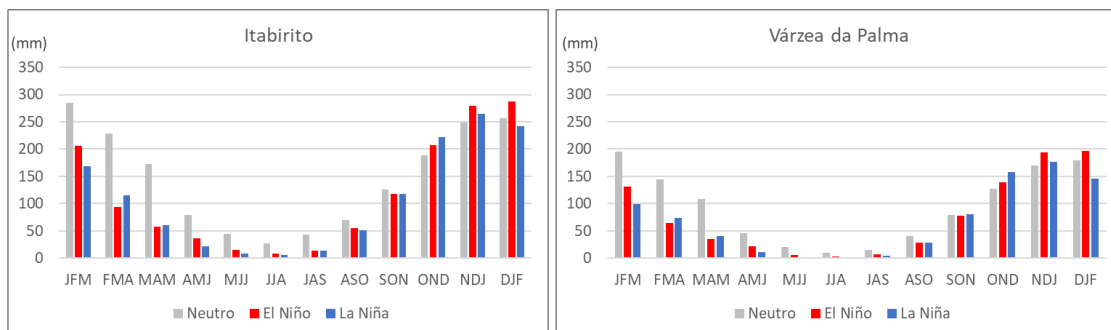


Figura A32: Precipitação média trimestral em períodos de atuação dos fenômenos El Niño e La Niña e em períodos neutros.

Tabela A10: Percentual da precipitação trimestral em eventos El Niño e La Niña em relação a períodos neutros.

Trimestre	Itabirito (%)		Várzea da Palma (%)	
	El Niño	La Niña	El Niño	La Niña
JFM	0,72	0,59	0,67	0,51
FMA	0,41	0,50	0,44	0,51
MAM	0,33	0,35	0,32	0,37
AMJ	0,47	0,28	0,48	0,25
MJJ	0,35	0,20	0,29	0,13
JJA	0,31	0,23	0,31	0,11
JAS	0,33	0,33	0,45	0,33
ASO	0,79	0,74	0,68	0,69
SON	0,94	0,94	0,97	1,02
OND	1,10	1,18	1,09	1,24
NDJ	1,12	1,06	1,14	1,04
DJF	1,12	0,94	1,10	0,81

Nos trimestres que abrangem os meses mais secos do ano (MJJ a JAS) o total pluviométrico trimestral é inferior a 50mm, não sendo significativo o excedente de chuvas em relação aos eventos ENOS já que a precipitação média¹⁶ anual destes municípios no período de 1961-2019 é de 1487,2mm (Itabirito) e 959,1mm (Várzea da Palma). O padrão se inverte quando iniciam os trimestres que abrangem o início da estação chuvosa na bacia. Em OND e NDJ a precipitação passa a ser de 6 a 18% maior em Itabirito e de 4 a 24% em Várzea da Palma do que em períodos normais, voltando a diminuir em DJF. Já sob eventos El Niño a precipitação é maior do que nos períodos neutros entre OND e DJF entre 10 e 12% em Itabirito e 9 e 14% em Várzea da Palma. Entre El Niño e La Niña, a

¹⁶ Desvio padrão de 295mm (Itabirito) e 236mm (Várzea da Palma).

precipitação no La Niña é cerca de 5 a 18% menor nos trimestres mais chuvosos (NDJ a JFM) em Itabirito, e de 9 a 26% menor em Várzea da Palma.

Na análise dos fenômenos ocorridos sob as fases frias e quentes da ODP, mantem-se a precipitação média trimestral mais elevada nos períodos neutros em relação aos eventos ENOS. Fica claro que eventos com sinais opostos (El Niño/La Niña em ODP Fria/Quente) apresentam média de precipitação trimestrais distintas. Assim, o El Niño na fase Quente tem totais pluviométricos maiores do que o El Niño na fase fria, assim como a precipitação é maior no La Niña na fase fria em relação à fase quente da ODP (FiguraFiguraA34) na bacia do Velhas. Por outro lado, comparando-se entre eles, El Niño na ODP fria apresenta média maiores de precipitação do La Niña na ODP Quente em todos os trimestres do ano.

Destaca-se também que a ocorrência dos eventos ENOS em fases coincidentes com a ODP (El Niño/La Niña em ODP Quente/Fria) reflete em um padrão trimestral de precipitação semelhante àquela da análise das médias sem influência da ODP. Em resumo, os totais pluviométricos assemelham-se em eventos de El Niño /ODP Quente e La Niña/ODP Fria, havendo um pequeno acréscimo de precipitação sob La Niña/ODP Fria no início da estação chuvosa (SON-NDJ) em comparação com os períodos de El Niño/ODP Quente.

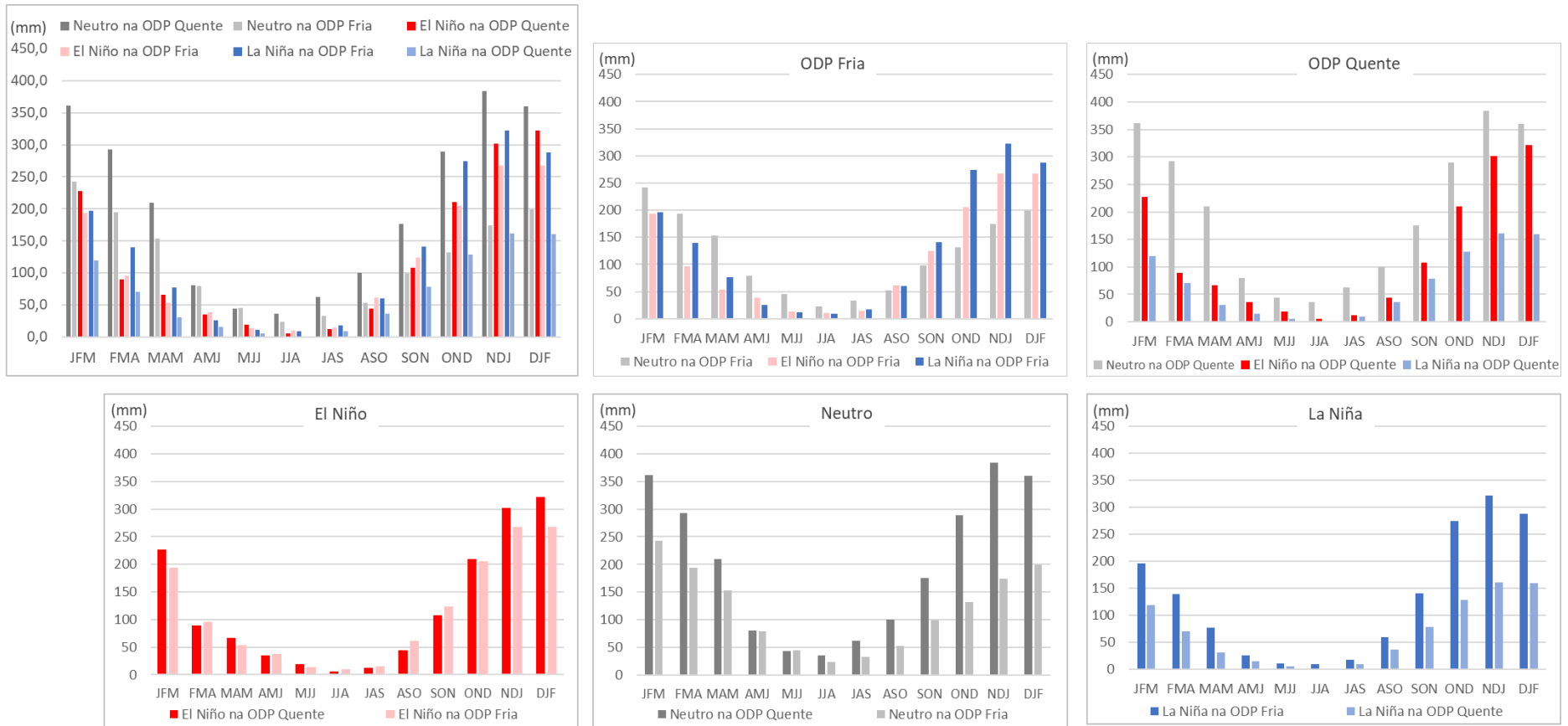


Figura A33: Precipitação média trimestral em eventos El Niño, La Niña e períodos neutros sob as fases fria e quente da ODP no município de Itabirito.

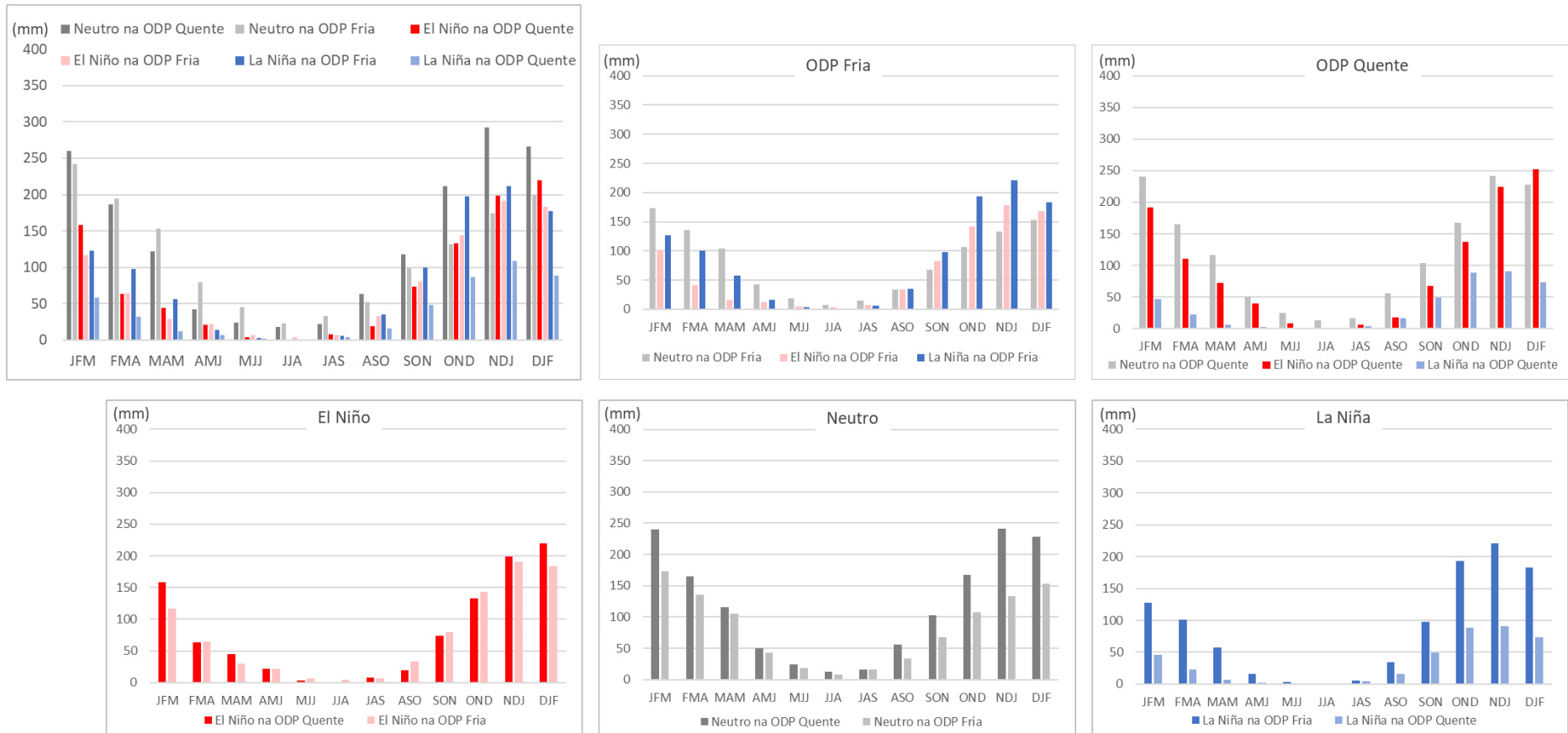


Figura A34: Precipitação média trimestral em eventos El Niño, La Niña e períodos neutros sob as fases fria e quente da ODP no município de Várzea da Palma.

A ocorrência dos eventos ENOS associados à ODP não geram uma relação clara e direta com a configuração de anos padrão na bacia hidrográfica do rio das Velhas. Há ocorrência de anos atípicos tanto na fase fria quanto quente da ODP, em ambas as combinações com os eventos El Niño/La Niña (Figuras 35 e 36). No entanto, algumas observações podem ser feitas a partir da Figura. Nos anos secos na alta bacia (Itabirito) não há ocorrência de trimestres chuvosos na ODP Quente e no baixo Velhas (Várzea da Palma) há mais que o dobro de trimestres chuvosos na ODP Fria. Ademais, o número de trimestres sob El Niño/ODP Fria nos anos secos é superior ao La Niña/ODP Fria que, no baixo Velhas, inclusive, é inexistente. No baixo Velhas, inclusive, não há configuração de eventos ENOS coincidentes com as fases da ODP, confirmando que fases opostas desses fenômenos influem na redução da precipitação.

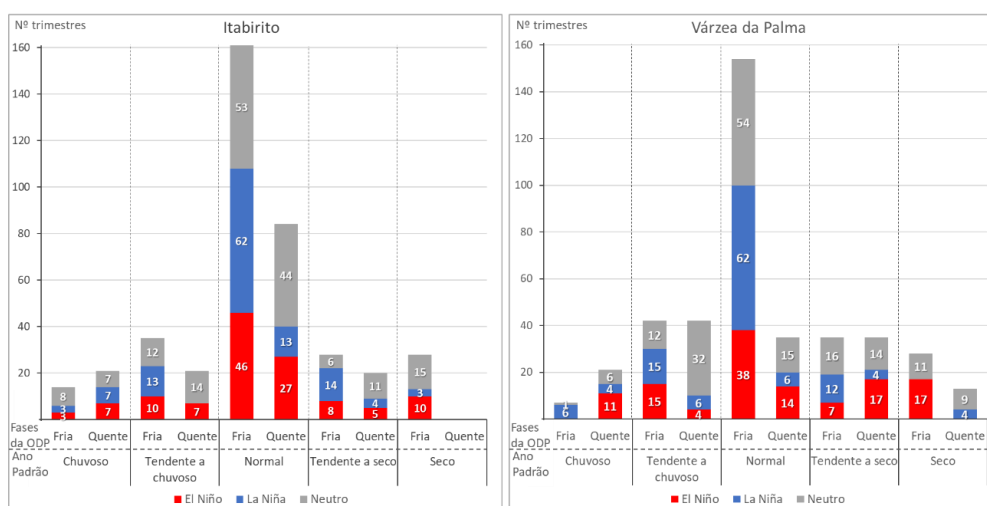


Figura A35: Número de trimestres chuvosos (SON-MAM) sob eventos El Niño/La Niña nas fases opostas da ODP e em anos padrão climatológicos.

Por outro lado, nos anos chuvosos há um maior número de trimestres em El Niño/ODP Quente na baixa bacia, porém na alta há o mesmo número de trimestres independente do evento ENOS. Ainda assim, o número total de trimestres na ODP Quente em anos chuvosos é superior aos trimestres em ODP Fria, o que confirma o que se observou na Figura A32 que aponta que a média de precipitação sob ODP Quente é superior a fase oposta do fenômeno. Já nos anos normais há uma predominância evidente de trimestres chuvosos na fase fria da ODP, assim como eventos ENOS com o mesmo sinal (La Niña/ODP Fria-El Niño ODP/Quente). Uma hipótese que se levanta aqui para explicar essa combinação que, na teoria, favoreceria excedentes de precipitação, é a intensidade desses fenômenos que pode ter influenciado os extremos de precipitação na bacia, o que carece de mais investigação. No entanto, para os anos tendentes a seco ou frio não há um padrão distinguível.

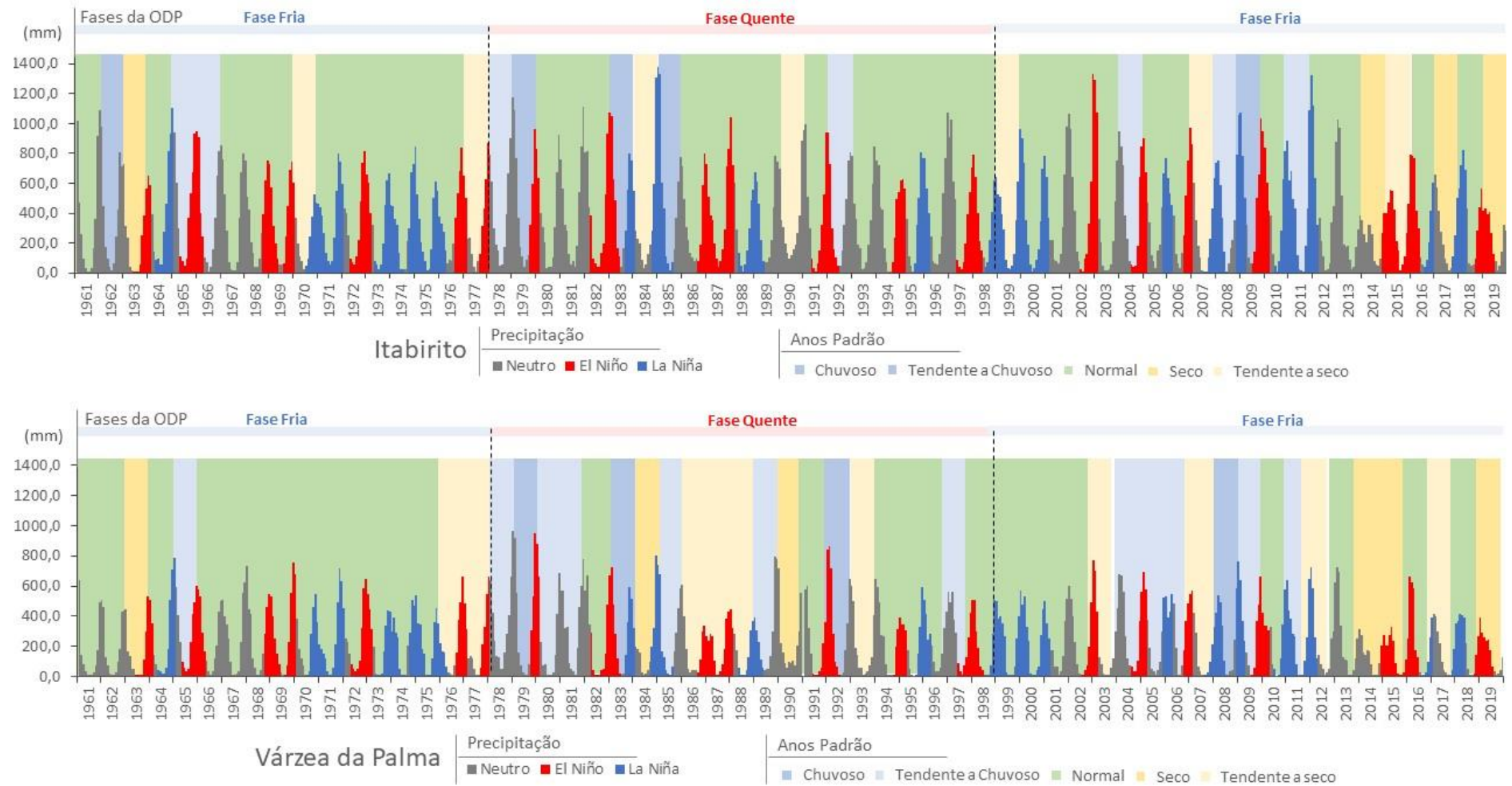


Figura A36: Precipitação trimestral nos municípios de Itabirito e Várzea da Palma de 1961 a 2019 e fases da ODP e do ENOS.

Considerações finais:

Conforme afirma Firpo e Sansigolo (2010), “a ODP não controla fisicamente o ENOS, mas os dois fenômenos interagem mutuamente e, portanto, não podem ser considerados independentes.” No entanto, a associação entre esses fenômenos pode ter efeitos combinados na distribuição das chuvas em algumas regiões como a definição de anomalias fortes de precipitação quando estão na mesma fase e anomalias fracas e mal definidas em fases opostas (ANDREOLI e KAYANO, 2005).

Tanto nas fases fria e quente da ODP, quando sob eventos El Niño/La Niña, e suas possíveis combinações, o incremento ou decréscimo significativo da precipitação acontece nos trimestres mais chuvosos do ano. No período seco, ainda que haja um pequeno distanciamento da precipitação acumulada nos diferentes períodos sob influência desses eventos, o acumulado de chuvas nesses meses não é significativo a ponto de interferir no padrão de chuva anual. Assim, uma estação chuvosa com excedente ou déficit de precipitação pode influir na configuração de um ano extremo, porém o mesmo não ocorre em relação ao período seco do ano que, sob nenhuma circunstância, acresce/decresce chuvas de maneira significativa para o total anual de precipitação.

Não foi possível identificar relações fortes entre os fenômenos de tele conexões analisados aqui com a precipitação na bacia hidrográfica do rio das Velhas, porém algumas considerações podem ser feitas. A fase quente da ODP contribui com a média mais elevada de precipitação, sobretudo nos trimestres mais chuvosos (NDJ-JFM). Os trimestres em que o ENOS se encontra em fases neutras são mais chuvosos de JFM a SON, enquanto os trimestres NDJ e DJF apresentam maior precipitação sob El Niño. Minuzzi *et al.* (2005) também observou um aumento das precipitações no início da estação chuvosa na região central e sul de Minas Gerais sob efeito do El Niño, enquanto Santos (2011) observou anomalias negativas quando houve a associação entre as fases frias da ODP e ENOS na parte mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco.

Nos municípios de Itabirito e Várzea da Palma, observou-se neste estudo que a combinação desses fenômenos acentua a precipitação quando eles ocorrem em fases coincidentes e reduz em fases opostas. Assim, trimestres em que há La Niña/ODP Fria tendem a ser mais chuvosos do que aqueles em que há El Niño/ODP Fria e vice-versa. No entanto, vale lembrar que nos trimestres sob influência da ODP Quente e El Niño, tendem a ser mais chuvosos do que aqueles sob ODP Fria e La Niña, com exceção dos trimestres OND e NDJ, ou seja, o início da estação chuvosa.

A relação entre esses fenômenos e os anos padrão na bacia demonstra que, embora haja ocorrência de ENOS/ODP em ambas as associações nos anos normais, predomina a ODP Fria nesses anos, assim como La Niña/ODP Fria nos mesmos. Nos anos extremos (secos e chuvosos) observa-se um número de trimestres chuvosos em fase quente e fria da ODP opostos, havendo mais trimestre na ODP Fria em anos secos, e o contrário nos anos chuvosos. Nos anos secos, inclusive, aconteceram eventos ENOS de sinais opostos a ODP, o que reforça a bibliografia que indica que fases contrárias desses eventos desfavorecem a precipitação (ANDREOLI e KAYANO, 2005; PRADO, 2011; SILVA *et al.*, 2012).

Algo interessante a se destacar é o fato de que a precipitação trimestral tende a ser maior nos períodos em que há ODP Quente porém associada a períodos neutros do ENOS do que em qualquer outra associação entre esses fenômenos. Aí destaca-se o ano de 1978 e 1979 os quais foram anos tendente a chuvoso e chuvoso, respectivamente, na bacia, com totais pluviométricos elevados no período chuvoso que resultaram em uma das maiores enchentes vivenciadas na capital mineira (WERNECK, 2012).

Por fim, ressalta-se que as observações feitas a partir dessa análise não são conclusivas e carecem de mais investigação que aponte a relação desses fenômenos com os mecanismos zonais da circulação atmosférica sobre a América do Sul e o comportamento da TSM do oceano Atlântico Sul.

APÊNDICE X

Anos padrão na bacia hidrográfica do rio das Velhas de 1991 a 2019

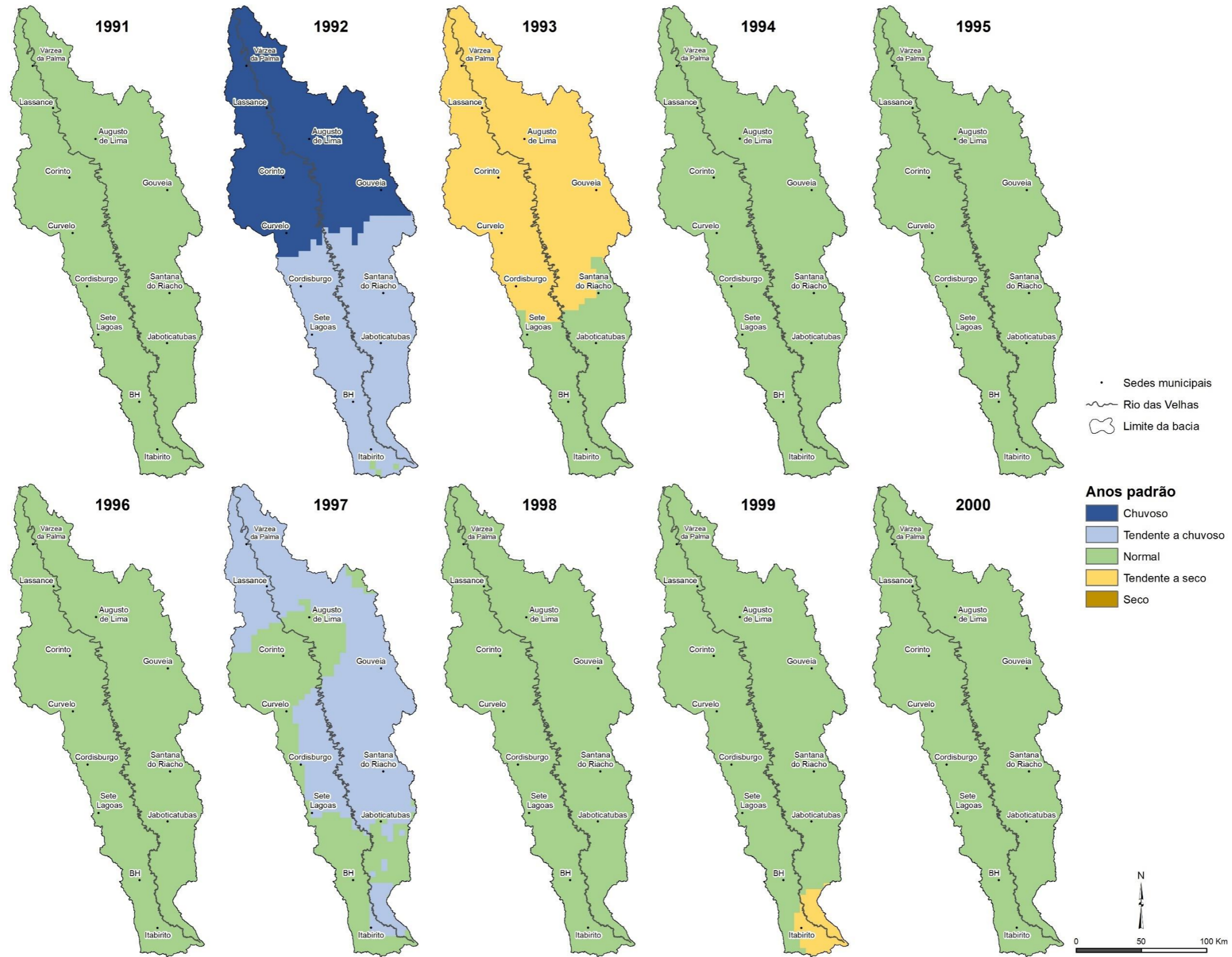


Figura A37: Anos padrão na bacia hidrográfica do rio das Velhas de 1991-2000.

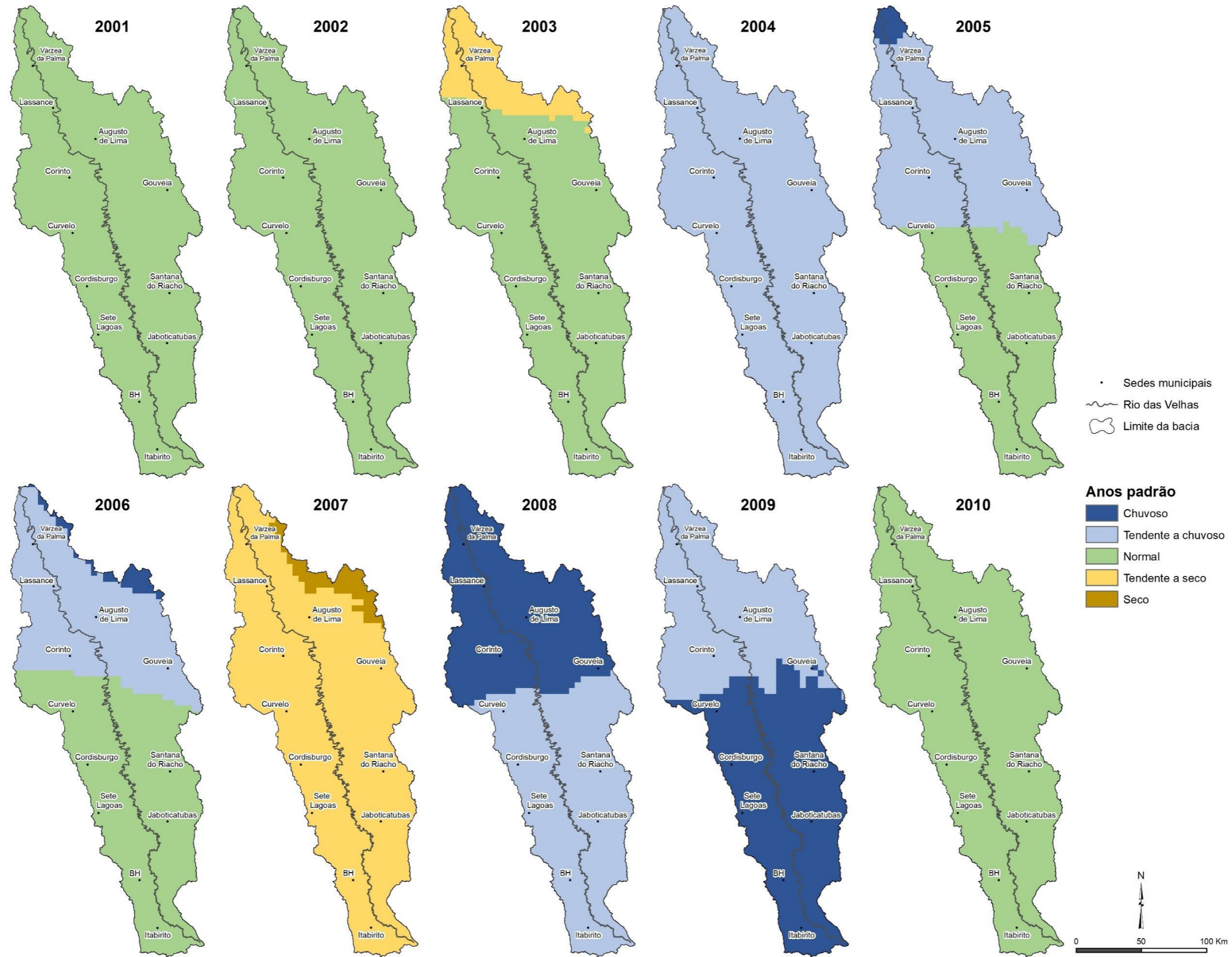


Figura A38: Anos padrão na bacia hidrográfica do rio das Velhas de 2001-2010.

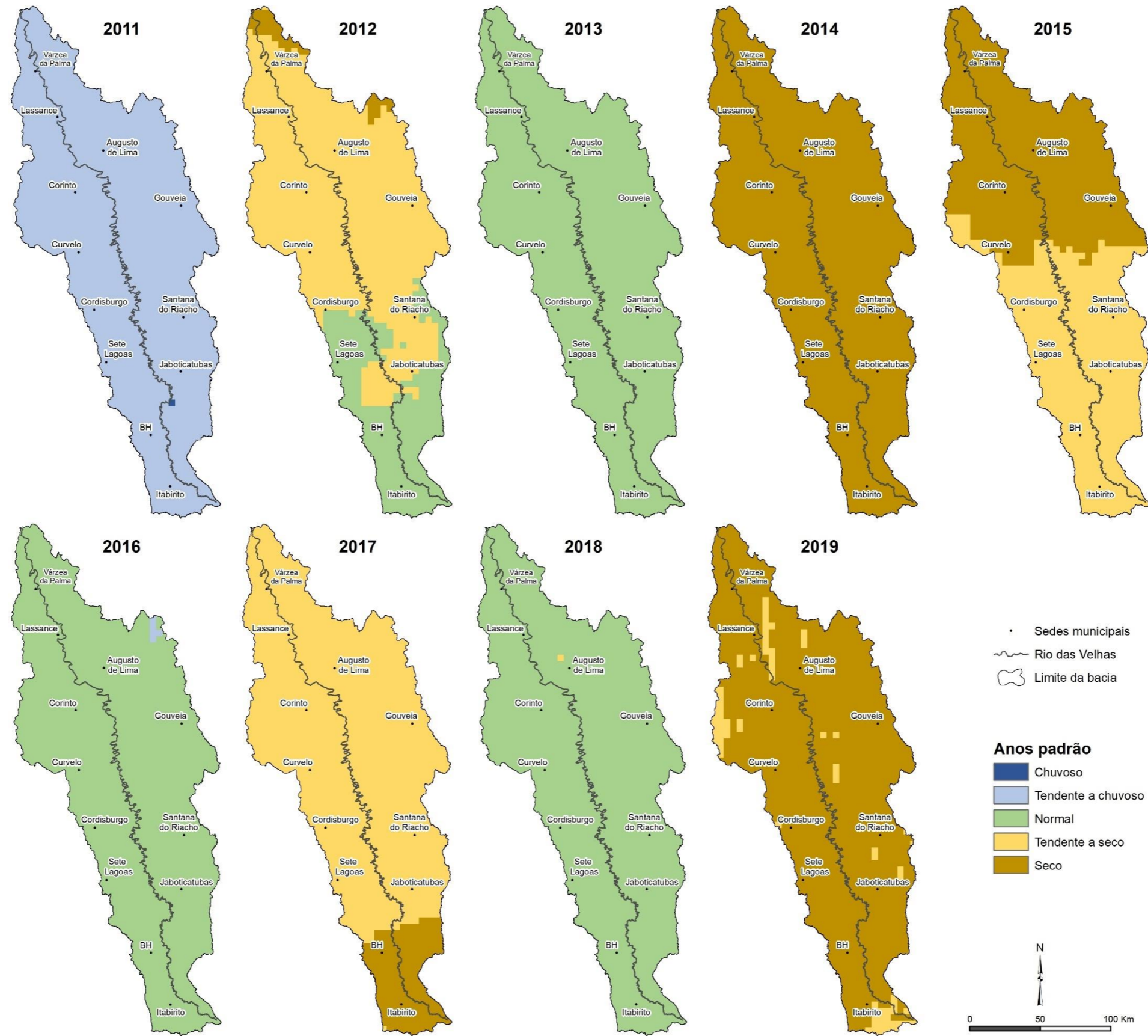


Figura A39: Anos padrão na bacia hidrográfica do rio das Velhas de 2011-2019