

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,  
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA EM UMA BACIA  
HIDROGRÁFICA ANDINA SOB CENÁRIOS DE  
MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

**Fernando Mauricio Castro Barrios**

**Belo Horizonte**

**2013**

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA EM UMA BACIA  
HIDROGRÁFICA ANDINA SOB CENÁRIOS DE  
MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

**Fernando Mauricio Castro Barrios**

**Fernando Mauricio Castro Barrios**

# **SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA ANDINA SOB CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem de processos hidrológicos

Orientador: Professor Luiz Rafael Palmier

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
2013

Página com as assinaturas dos membros da banca examinadora, fornecida pelo Colegiado do Programa

## AGRADECIMENTOS

A Deus todo poderoso e a Nossa Senhora, por suas infinitas bênçãos. Obrigado por trazer-me a este lindo lugar e dar-me a oportunidade de crescer como pessoa e como profissional, além de conhecer pessoas maravilhosas e vivenciar momentos únicos e inesquecíveis.

À *Corporación Autónoma Regional del Tolima* (CORTOLIMA) e à doutora Carmen Sofia Bonilla, pela oportunidade e apoio para fazer o doutorado na Universidade Federal de Minas Gerais.

Aos meus amigos da CORTOLIMA, especialmente ao Einar Diaz Triana, por acreditar sempre em mim, em meus sonhos e na minha capacidade.

À Organização dos Estados Americanos (OEA), pela colaboração e pela ajuda.

À minha esposa, Rocio, e ao meu filho, Luisfer, pela paciência e compreensão nas noites que me dediquei à elaboração deste trabalho e por serem minha fonte de alegria e sossego nos momentos difíceis.

À minha família, pelo apoio incondicional, mesmo a distância, e por acreditar na realização desta etapa na minha vida: ao meu pai, pelo seu amor; aos meus irmãos, Ivan, Rocio, Danilo e Javier, pelo carinho e pelo apoio na busca de meus sonhos. Obrigado pela confiança e pelo orgulho que sempre demonstraram ter em mim.

Aos meus irmãos em Deus, Alexandre e à sua família (Geise, Guilherme, Gu e Gabriel), ao Wanderson, Miguel, Fabio, Saulo, Geraldo, Paulo e Emerson e à Ada, Janet e Neide, pela sinceridade e amizade, pela ajuda nos momentos difíceis durante minha inesquecível passagem pelo Brasil; agradeço toda disposição e ajuda para resolver meus problemas e pelas palavras oportunas e cheias de carinho e compreensão.

Ao professor Luiz Rafael Palmier e à sua família, pela competente orientação e ajuda, pelo incentivo, pela amizade e pela compreensão de minhas limitações; agradeço por tudo que fizeram por mim e por minha família.

Ao Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, por me proporcionar preparação, formação e desenvolvimento como pesquisador.

A todos os professores das disciplinas que cursei, pelo conhecimento proporcionado e pela disponibilidade brindada.

Aos meus amigos do coração, Margarita, Rafael e Jessica, por estarem sempre comigo, dando-me ânimo para continuar na luta.

Ao professor Jose Daniel Pabón (*Universidad Nacional de Colombia*), pelo apoio, pela ajuda, pelo incentivo e pela colaboração imprescindível na conclusão da pesquisa.

Ao professor Nelson Obregon, da Universidade Javeriana (Colômbia), pela colaboração na área de modelagem hidrológica e pelos conselhos na conclusão da pesquisa.

Ao Centro Internacional de Agricultura Tropical da Colômbia, pela colaboração na área de modelagem hidrológica e pela ajuda com o modelo SWAT.

Aos estudantes de Engenharia Florestal da Universidade do Tolima (Colômbia), Cristian, Enrique e Luísa, pela colaboração e dedicação.

A todas as pessoas no Brasil e na Colômbia que, de alguma forma, contribuíram para a evolução deste trabalho.

## RESUMO

Entre os grandes desafios da gestão da água para o século XXI, os impactos de mudanças climáticas são, certamente, questões que afetam diretamente à vida humana em dois dos seus mais conhecidos efeitos, a escassez e o excesso de água. Nesta pesquisa propôs-se avaliar o eventual efeito de mudanças climáticas na hidrologia em uma bacia hidrográfica, mediante a combinação de modelos hidrológicos com cenários de gases de efeito estufa derivados das saídas de Modelos de Circulação Geral (GCM) e Modelos de Circulação Regional (RCM); além de detalhar os procedimentos ou encadeamentos dos modelos, o componente de inovação é a aplicação desse conjunto de sistemas de modelagem para uma bacia hidrográfica montanhosa andina. Foram geradas simulações dos climas presente e futuro para os períodos 1988-2007 e 2011-2030 com o Modelo de Circulação Geral da Atmosfera HadCM3, com o Cenário A1B proposto pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Os resultados dessas simulações serviram como condições de contorno para o modelo de circulação regional da atmosfera PRECIS (*Providing Regional Climates for Impact Studies*), com 19 níveis verticais e 25 km de resolução horizontal; as previsões climáticas numéricas resultantes do aninhamento do modelo PRECIS em um modelo HadCM3-A1B foram usadas para calcular vazões em uma bacia hidrográfica andina. Escolheu-se como estudo de caso a bacia hidrográfica do rio Coello (BHRC), localizada na vertente oriental da Cordilheira Andina Central, na República da Colômbia, Departamento de Tolima, com área de drenagem da ordem de 1.817 km<sup>2</sup>. Para correção dos erros sistemáticos nas previsões de precipitação, aplicou-se uma transformação da curva de distribuição de probabilidades de precipitação que tem como vantagem a manutenção da variabilidade interanual; as precipitações previstas e corrigidas foram usadas como entrada para o modelo chuva-vazão distribuído SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). Com relação ao período atual, foram obtidos os seguintes cenários de previsão na bacia do rio Coello para o 2011-2030: redução de 3,5% da vazão média anual, redução de 1,6% e 3,8% das vazões Q<sub>10</sub> e Q<sub>90</sub>, respectivamente, da curva de permanência; aumento de 4,0% na evapotranspiração real. O enfoque metodológico proposto apresenta-se promissor para a análise de impactos de eventuais mudanças climáticas sobre os recursos hídricos de bacias hidrográficas colombianas localizadas em regiões andinas. Face às incertezas da metodologia, devido às simplificações e limitações dos modelos matemáticos utilizados, os resultados obtidos devem ser utilizados com cautela. Ainda assim, destaca-se a preocupação com a verificação de que os valores estimados de vazão média mensal na BHRC para o período 2011-2030 foram inferiores àqueles observados no período 1988-2007.

## ABSTRACT

Among the great challenges of water management for the twenty-first century, the impacts of climate changes are issues that certainly affect directly human life because two of their most known effects: the lack and the excess of water. The objective of this research is to evaluate the potential effects of climate change on hydrology in a watershed by combining hydrological models and scenarios of greenhouse gases arising from the disposal of general circulation models (GCM) and regional circulation models (RCM); besides detailing the proceedings or chains of these models, the component of innovation is the implementation of this set of systems modeling for an Andean mountain watershed. Rainfall and streamflow simulations were developed for present and future climates for the period from 1988 to 2007 and from 2011 to 2030 with the global atmospheric model HadCM3-Scenario A1B proposed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The simulation results served as boundary conditions for the regional circulation model PRECIS (Providing Regional Climates for Impact Studies) with 19 vertical levels and 25 km horizontal resolution; the numerical weather forecasts resulting from the nesting of regional circulation model (PRECIS) in a general circulation model of the atmosphere (HadCM3-A1B) were used to predict flows in an Andean basin. The Coello River basin, chosen as a case study, is located in the eastern slope of central Andes, at the Tolima Department, Colombia, with a drainage area of 1,817 km<sup>2</sup>. In order to correct the systematic errors in the precipitation forecasts, it was applied a transformation of the rainfall probability distribution curve, which has the advantage of handling inter-annual variability; the corrected rainfall was used as input to run the distributed hydrological model SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Regarding the current period, the following scenarios forecasts in the Coello River basin for the 2011-2030 period were obtained: reduction of 3.5% of the average annual flow, reduction of 1.6% and 3.8% of the Q<sub>10</sub> and Q<sub>90</sub> values, respectively, from the flow-duration curve; increase of 4.0% in actual evapotranspiration. The proposed methodological approach is promising for the analysis of potential impacts of climate change on water resources in Colombian river basins located in the Andean regions. Given the uncertainties of the methodology, due to simplifications and limitations of the mathematical models used, the results should be used with caution. In any case, there is a concern with the finding that the estimated values of monthly average flow in the Coello River basin for the 2011-2030 period were lower than those observed in the 1988-2007 one.

# SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>viii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>x</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xiv</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS</b> .....	<b>xvi</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>5</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	5
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
<b>3 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>6</b>
3.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS .....	6
3.2 MODELOS DINÂMICOS DE PREVISÃO ATMOSFÉRICA .....	13
3.2.1 Modelos de Circulação Geral (GCM).....	14
3.2.2 Modelos de Circulação Regional (RCM).....	21
3.2.3 Estudos de modelagem climática na América do Sul.....	26
3.3 MODELOS HIDROLÓGICOS.....	29
3.4 INTEGRAÇÃO DE MODELOS ATMOSFÉRICOS E HIDROLÓGICOS PARA AVALIAÇÃO DE POSSÍVEIS EFEITOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS .....	37
3.5 DESAFIOS DA INTEGRAÇÃO DE MODELOS ATMOSFÉRICOS E HIDROLÓGICOS.....	44
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>51</b>
4.1 ÁREA DE ESTUDO .....	51
4.1.1 Climatologia.....	52
4.1.2 Uso e cobertura do solo .....	54
4.1.3 Solos .....	58
4.2 MATERIAIS .....	63
4.2.1 Material cartográfico.....	63
4.2.2 Imagens de satélite .....	63
4.2.3 Sistemas computacionais.....	64
4.3 METODOLOGIA .....	64
4.3.1 Previsão climática.....	67
4.3.1.1 Modelo global utilizado para fornecer as condições de contorno do modelo regional .....	67
4.3.1.2 Modelo de circulação regional utilizado para a regionalização ( <i>downscaling</i> ).....	68
4.3.1.3 Validação do modelo de circulação regional.....	72
4.3.2 Modelo de simulação hidrológica .....	74
4.3.2.1 Geração do Modelo Digital de Elevação (MDE).....	77
4.3.2.2 Geração do mapa de uso e ocupação do solo.....	77
4.3.2.3 Geração do mapa de solos .....	78
4.3.2.4 Parâmetros climáticos e hidrológicos .....	79
4.3.2.5 Análise de sensibilidade .....	83
4.3.2.6 Calibração e validação.....	84
4.3.3 Previsões de vazões com base nos dados climáticos do modelo PRECIS .....	85
4.3.4 Avaliação dos possíveis efeitos das mudanças climáticas nos recursos hídricos... 85	

<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>86</b>
5.1	PREVISÕES CLIMÁTICAS DO MODELO PRECIS .....	86
5.1.1	<i>Previsões de temperatura</i> .....	86
5.1.2	<i>Previsões de precipitação</i> .....	89
5.1.3	<i>Correção de erros sistematicos de precipitação</i> .....	96
5.2	SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO COELLO .....	99
5.2.1	<i>Dados de entrada do modelo SWAT</i> .....	99
5.2.2	<i>Análise de sensibilidade do modelo SWAT</i> .....	105
5.2.3	<i>Calibração e validação</i> .....	105
5.2.4	<i>Análise das curvas de permanência simuladas</i> .....	112
5.3	PREVISÕES DE VAZÃO COM BASE NAS ESTIMATIVAS CLIMÁTICAS DO MODELO PRECIS ....	112
5.4	INFLUÊNCIA DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE OS RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA DO RIO COELLO.....	115
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>121</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>124</b>
	<b>APÊNDICE A</b> – Script em GrADS ( <i>Grid Analysis and Display System</i> ) para transformar as variáveis do formato PP para o formato ASCII.....	138
	<b>APÊNDICE B</b> – Script em GrADS ( <i>Grid Analysis and Display System</i> ) para extrair dados diários da rodada do modelo PRECIS para o cenário A1B, período 1988-2010.....	141
	<b>APÊNDICE C</b> – Características físicas dos solos da bacia hidrográfica do rio Coello exigidas pelo modelo SWAT.....	146

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Resolução geográfica das gerações de modelos climáticos utilizados nos relatórios do IPCC (Fonte: adaptada de IPCC, 2007) .....	8
Figura 3.2 – Sistema climático, componentes e interações (Fonte: Silva, 2005).....	14
Figura 3.3 – Discretização espacial das características básicas e processos dos GCM (Fonte: Silva, 2005) .....	15
Figura 3.4 – Interações entre atmosfera, oceanos e continentes, representadas pelos modelos globais (Fonte: Silva, 2005).....	17
Figura 3.5 – Emissões globais anuais de CO <sub>2</sub> de todas as fontes, em gigatoneladas de carbono por ano (GtC/ano), para os cenários A1, A2, B1 e B2 (Fonte: adaptada de NAKICENOVIC <i>et al.</i> , 2000).....	17
Figura 3.6 – Detalhamento da resolução dos modelos climáticos por meio da técnica de <i>downscaling</i> (Fonte: Silva, 2005).....	24
Figura 3.7 – Metodologia usada para avaliar os efeitos de mudanças climáticas e cenários de evolução do uso do solo na bacia hidrográfica do rio Chaudière, Canadá (Fonte: Quilbé <i>et al.</i> , 2008).....	42
Figura 4.1 – Localização da área de estudo.....	52
Figura 4.2 – Precipitação e hidrograma de vazões médias mensais observadas na BHRC no período 1988-2007 .....	53
Figura 4.3 – Tipologias climáticas da BHRC segundo a classificação de Caldas-Lang (Fonte: CORTOLIMA, 2005).....	54
Figura 4.4 – Mapa de uso e ocupação do solo da BHRC.....	57
Figura 4.5 – Mapa de solos da BHRC (Fonte: adaptada de IGAC, 2007).....	62
Figura 4.6 – Fluxograma representativo da metodologia (Fonte: adaptada de QUILBÉ <i>et al.</i> , 2008).....	65
Figura 4.7 – Mapa da Colômbia destacando o domínio e a grade do modelo PRECIS .....	69
Figura 4.8 – Grade, domínio e resolução estabelecida sobre a área de trabalho nas simulações com o modelo PRECIS.....	71
Figura 4.9 – Pontos da grade com previsão do modelo PRECIS para a BHRC, com espaçamento de 25 km.....	72
Figura 4.10 – Esquema de interpolação das variáveis climáticas a partir dos pontos da grade com previsão do modelo PRECIS.....	72
Figura 4.11 – Correção de erros sistemáticos dos valores de precipitação prevista diária com base nas curvas de distribuição de probabilidades acumuladas dos valores observados e previstos pelo modelo PRECIS .....	74

Figura 4.12 – Procedimento para geração da base de dados e simulação do modelo SWAT via SIG (Fonte: MACHADO, 2002).....	76
Figura 4.13 – Janela na qual são inseridos os dados de solo requeridos pelo modelo SWAT, para cada classe de solo e em cada horizonte.....	79
Figura 4.14 – Localização e distribuição das estações climatológicas na BHRC.....	80
Figura 4.15 – Localização e distribuição das estações pluviométricas na BHRC.....	80
Figura 4.16 – Localização e distribuição dos postos fluviométricos na BHRC.....	82
Figura 4.17 – Janelas para entrada de dados climáticos diários no modelo SWAT.....	82
Figura 5.1 – Distribuição espacial das temperaturas medias multianuais do ar para dados observados (a) e simulados com o modelo PRECIS, com condições de contorno ERA40 reanálises (b), NCAR/NCEP reanálises (c) e HadCM3 (d), para o período 1988-2007.....	87
Figura 5.2 – Viés da temperatura (°C) simulada pelo modelo PRECIS, utilizando como condição de contorno ERA40 reanálises (a), NCAR/NCEP reanálises (b) e HadCM3 (c), para o período 1988-2007.....	88
Figura 5.3 – Ciclo anual da temperatura do ar observada e simulada com o modelo PRECIS, utilizando como condições de contorno dados provenientes de ERA40 reanálises, NCAR/NCEP reanálises e HadCM3, para o período 1988-2007.....	89
Figura 5.4 – Distribuição espacial dos valores médios multianuais de precipitação para dados observados (a) e simulados com o modelo PRECIS, com condições de contorno ERA40 reanálises (b), NCAR/NCEP reanálises (c) e HadCM3 (d), para o período 1988-2007.....	90
Figura 5.5 – Viés da precipitação (mm) simulada pelo modelo PRECIS, com condição de contorno ERA40 reanálises (a), NCAR/NCEP reanálises (b) e HadCM3 (c), para o período 1988-2007.....	92
Figura 5.6 – Ciclo anual das precipitações observadas e simuladas com o modelo PRECIS, com condições de contorno ERA40 reanálises, NCAR/NCEP reanálises e HadCM3, para o período 1988-2007.....	95
Figura 5.7 – Distribuição espacial dos coeficientes de correlação entre as séries de precipitação observadas e simuladas com o modelo PRECIS, com condições de contorno ERA40 reanálises (a), NCAR/NCEP reanálises (b) e HadCM3 (c), para o período 1988-2007.....	96
Figura 5.8 – Curvas de distribuição de probabilidades das precipitações mensais observadas e geradas pelo modelo PRECIS na estação Cajamarca para o período 1988-2007 – janeiro (a), fevereiro (b), março (c), abril (d), maio (e), junho (f), julho (g), agosto (h), setembro (i), outubro (j), novembro (k) e dezembro (l).....	98
Figura 5.9 – Modelo digital de elevação (MDE) com a hidrografia principal da BHRC .....	100
Figura 5.10 – Subdivisões da BHRC, com os pontos de confluência gerados pelo modelo SWAT e os pontos adicionados indicando os locais de coleta de dados fluviométricos do IDEAM.....	101
Figura 5.11 – Distribuição espacial das estações pluviométricas e climatológicas, com subdivisões da BHRC gerada pelo modelo SWAT .....	102

Figura 5.12 – Unidades de Resposta Hidrológica presentes na BHRC.....	107
Figura 5.13 – Hietograma médio observado e hidrogramas observado e modelado da rodada inicial do modelo SWAT no posto fluviométrico Payande.....	108
Figura 5.14 – Hietograma médio observado e hidrogramas observado e calculado para o posto fluviométrico Payande durante a calibração do modelo. ....	109
Figura 5.15 – Hietograma médio observado e hidrogramas observado e calculado para o posto fluviométrico Payande durante a validação do modelo.....	109
Figura 5.16 – Valores médios mensais de precipitação, vazão calculada e vazão observada para o período 1990-2007. ....	109
Figura 5.17 – Variabilidade interanual de vazões para o período 1990-2007.....	110
Figura 5.18 – Evolução temporal dos resíduos entre as vazões observadas e calculadas na BHRC....	110
Figura 5.19 – Dispersão dos resíduos entre as vazões observadas e calculadas em relação à vazão média mensal observada na BHRC.....	111
Figura 5.20 – Vazões médias mensais <i>versus</i> observadas no posto fluviométrico (Payande período 1990-2007).....	111
Figura 5.21 – Curvas de permanência de vazões observadas e calculadas pelo modelo SWAT no posto fluviométrico Payande (período 1990-2007).....	112
Figura 5.22 – Valores médios mensais de precipitação gerada pelo modelo PRECIS com prévia correção dos erros sistemáticos, vazão calculada pelo modelo SWAT-PRECIS e vazão observada para o período 1990-2007 .....	113
Figura 5.23 – Vazões médias mensais (1988-2007) observadas obtidas pelo modelo SWAT com dados climatológicos observados e obtidas pelo modelo SWAT com valores climatológicos gerados pelo modelo PRECIS (SWAT-PRECIS).....	113
Figura 5.24 – Comparação entre as vazões médias calculadas pelo modelo SWAT – com dados observados de precipitação (SWAT) e com valores de precipitação gerados pelo modelo PRECIS (SWAT-PRECIS) – e vazões médias observadas (período 1988-2007).....	114
Figura 5.25 – Curvas de permanência observada, gerada pelo modelo SWAT e obtidas da aplicação das saídas corrigidas do modelo PRECIS no modelo SWAT (SWAT-PRECIS), no período 1988-2007).....	115
Figura 5.26 – Precipitação média mensal para os períodos atual (1988-2007) e futuro (2011-2030).....	116
Figura 5.27 – Temperatura e amplitude média mensal para os períodos atual (1988-2007) e futuro (2011-2030).....	116
Figura 5.28 – Evapotranspiração potencial (ETP) média mensal para os períodos atual (1988-2007) e futuro (2011-2030).....	117
Figura 5.29 – Evapotranspiração real (ET) média mensal para os períodos atual (1988-2007) e futuro (2011-2030).....	117

Figura 5.30 – Vazões médias mensais para os períodos atual (1988-2007) e futuro (2011-2030) .....	118
Figura 5.31 – Diferença média da quantidade de água (mm) para os períodos atual (1988-2007) e futuro (2011-2030) .....	119
Figura 5.32 – Curvas de permanência para os períodos atual (1988-2007) e futuro (2011-2030) .....	119

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resumo comparativo das vantagens e desvantagens da utilização das técnicas de <i>downscaling</i> .....	23
Tabela 3.2 – Sumário das estatísticas de avaliação utilizadas.....	25
Tabela 4.1 – Províncias climáticas na BHRC (Caldas-Lang).....	55
Tabela 4.2 – Áreas, em hectares (ha) e porcentagem (%), das subclasses de uso e ocupação do solo na BHRC.....	58
Tabela 4.3 – Blocos de tipos de solos da BHRC.....	60
Tabela 4.4 – Classes de solos originais e áreas, em hectares (ha) e porcentagem (%) da área total da BHRC.....	61
Tabela 4.5 – Classes de solos refinadas e áreas, em hectares (ha) e porcentagem (%) da área total da BHRC.....	61
Tabela 4.6 – Cartas planialtimétricas da BHRC .....	63
Tabela 4.7 – Características da grade utilizada nas simulações com o modelo PRECIS.....	69
Tabela 4.8 – Estações de dados climatológicos.....	80
Tabela 4.9 – Estações pluviométricas, códigos oficiais, elevações e coordenadas UTM.....	81
Tabela 4.10 – Postos fluviométricos da BHRC.....	82
Tabela 5.1 – Viés da temperatura (°C) simulada pelo modelo PRECIS, utilizando como condição de contorno ERA40 reanálise, para o período 1988-2007 .....	87
Tabela 5.2 – Viés da temperatura (°C) simulada pelo modelo PRECIS, utilizando como condição de contorno NCAR/NCEP reanálise, para o período 1988-2007 .....	87
Tabela 5.3 – Viés da temperatura (°C) simulada pelo modelo PRECIS, utilizando como condição de contorno HadCM3, para o período 1988-2007 .....	87
Tabela 5.4 – Coeficientes de correlação entre os ciclos anuais das temperaturas do ar observada e simuladas com o modelo PRECIS utilizando como condições de contorno ERA40 reanálises, NCAR/NCEP reanálises e HadCM3, para o período 1988-2007 .....	88
Tabela 5.5 – Viés da precipitação (mm) simulada pelo modelo PRECIS, utilizando como condição de contorno ERA40 reanálise, para o período 1988-2007 .....	91
Tabela 5.6 – Viés da precipitação (mm) simulada pelo modelo PRECIS, utilizando como condição de contorno NCAR/NCEP reanálise, para o período 1988-2007 .....	91
Tabela 5.7 – Viés da precipitação (mm) simulada pelo modelo PRECIS, utilizando como condição de contorno HadCM3, para o período 1988-2007 .....	92
Tabela 5.8 – Coeficientes de correlação entre os ciclos mensal e anual da precipitação observada e simulada com o modelo PRECIS, utilizando como condições de contorno ERA40 reanálises, para o período 1988-2007 .....	93
Tabela 5.9 – Coeficientes de correlação entre os ciclos mensal e anual da precipitação observada e simulada com o modelo PRECIS, utilizando como condições de contorno NCAR/NCEP reanálises, para o período 1988-2007 .....	94

Tabela 5.10 – Coeficientes de correlação entre os ciclos mensal e anual da precipitação observada e simulada com o modelo PRECIS, utilizando como condições de contorno HadCM3, para o período 1988-2007 .....	94
Tabela 5.11 – Sub-bacias geradas pelo modelo SWAT, com áreas em hectares (ha) e porcentagem (%).....	99
Tabela 5.12 – Parâmetros climáticos referentes à estação Cajamarca .....	103
Tabela 5.13 – Parâmetros climáticos referentes à estação Santiago Vila.....	104
Tabela 5.14 – Parâmetros climáticos referentes à estação Nataima.....	104
Tabela 5.15 – Parâmetros climáticos referentes à estação Perales Hato Opia .....	104
Tabela 5.16 – Parâmetros climáticos referentes à estação Aeropuerto Perales .....	104
Tabela 5.17 – Parâmetros climáticos referentes à estação Chicoral.....	105
Tabela 5.18 – Valores dos parâmetros utilizados nas simulações inicial e final .....	108
Tabela 5.19 – Valores das estatísticas de precisão resultantes da aplicação do modelo SWAT na simulação hidrológica da BHRC, para os períodos de calibração e validação.....	108
Tabela 5.20 – Variação percentual das vazões médias anuais nos percentis 10%, 50% e 90% para o período futuro (2011-2030) em relação ao período atual (1988-2007) .....	120

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A1	Cenário de emissão de gases de efeito estufa
A1B	Cenário de emissão de gases de efeito estufa
A1F	Cenário de emissão de gases de efeito estufa
A1T	Cenário de emissão de gases de efeito estufa
A2	Cenário de emissão de gases de efeito estufa
ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base, em dias <sup>-1</sup> (modelo SWAT)
ANION_EXCL	Porosidade do solo (modelo SWAT)
AR4	Quarto Relatório de Avaliação do IPCC
<i>ArcGis</i>	<i>Software</i> de Informação Geográfica
B1	Cenário de emissão de gases de efeito estufa
B2	Cenário de emissão de gases de efeito estufa
BHRC	Bacia hidrográfica do rio Coello
CLAY	Porcentagem de argila no solo (%peso solo) (modelo SWAT)
CN2	Número de Curva do método SCS
COE	Coefficiente de Nash-Sutcliffe
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CORTOLIMA	<i>Corporación Autónoma Regional del Tolima</i>
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CREAMS	<i>Chemicals, Runoff, Erosion from Agricultural Management Systems</i>
CRU	<i>Climatic Research Unit</i>
D <sub>v</sub> %	Desvio do evento analisado
E <sub>a</sub>	E <sub>a</sub> evapotranspiração diária (mm) (variável de estado do modelo SWAT)
ESCO	Fator de compensação de evaporação de água no solo (modelo SWAT)
ET	Evapotranspiração real (mm)
ETP	Evapotranspiração potencial (mm)
FAR	Primeiro Relatório de Avaliação do IPCC
GCM	Modelo de Circulação Geral
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLEAMS	<i>Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems</i>
GrADS	<i>Grid Analysis and Display System</i>
GW_DELAY	Tempo de retardo do escoamento subterrâneo (dia) (modelo SWAT)
GWQMN	Profundidade mínima de água do aquífero raso para ocorrência de escoamento subterrâneo (mm) (modelo SWAT)
H <sub>o</sub>	Radiação extraterrestre (MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )
HadCM3	Modelo de circulação global do <i>Hadley Centre for Climate Prediction and Research</i>
HRU	Unidade de Resposta Hidrológica
HYDGRP	Grupo hidrológico do solo (modelo SWAT)
IDEAM	<i>Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales para Colombia</i>
IGAC	<i>Instituto Geográfico Agustín Codazzi</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MM5	<i>Mesoscale Meteorological Model 5</i>
N	Número de eventos
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>

NLAYERS	Número de camadas (modelo SWAT)
O	Valor observado de uma variável meteorológica
$\bar{O}$	Média de valores observados de uma variável hidrológica
PCPD	Número médio de dias chuvosos no mês (modelo SWAT)
PCPMM	Precipitação média mensal (mm) (modelo SWAT)
PCPSKW	Coeficiente de assimetria para a precipitação diária no mês (modelo SWAT)
PCPSTD	Desvio padrão da precipitação diária no mês (mm/dia) (modelo SWAT)
PR_W1	Probabilidade dos dias de chuva seguidos de dias de seca (modelo SWAT)
PR_W2	Probabilidade dos dias de chuva seguidos de dias de chuva (modelo SWAT)
PRECIS	<i>Providing Regional Climates for Impacts Studies</i>
$Q_{gw}$	Fluxo diário de água subterrânea (mm) (variável de estado do modelo SWAT)
$Q_{OBS}$	Vazão observada (m <sup>3</sup> /s)
$\bar{Q}_{OBS}$	Média da vazão observada (m <sup>3</sup> /s)
$Q_{SIM}$	Vazão simulada (m <sup>3</sup> /s)
$\bar{Q}_{SIM}$	Média da vazão simulada (m <sup>3</sup> /s)
$Q_{surf}$	Escoamento superficial diário (mm) (variável de estado do modelo SWAT)
$R^2$	Coeficiente de correlação
RAINHHMX	Precipitação máxima de 0,5 horas de todo o período de registros em um determinado mês (mm) (modelo SWAT)
RCHRG_DP	Fração de água percolada para o aquífero profundo (modelo SWAT)
RCM	Modelo de Circulação Regional
$R_{day}$	Precipitação diária (mm) (variável de estado do modelo SWAT)
REVAPMN	Profundidade mínima de água no aquífero superficial para ocorrência de percolação para o aquífero profundo (mm) (modelo SWAT)
RMSE	Erro quadrático médio
ROCK	Porcentagem de pedregulho no solo (%peso solo) (modelo SWAT)
S	Valor simulado de uma variável meteorológica
$\bar{S}$	Média de valores simulados de uma variável hidrológica
SAND	Porcentagem de areia no solo (%peso solo)
SAR	Segundo Relatório de Avaliação
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SHALLST	Profundidade inicial de água no aquífero raso (mm) (modelo SWAT)
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SILT	Porcentagem de silte no solo (%peso solo) (modelo SWAT)
SNAM	Nome do solo (modelo SWAT)
SOL_ALB	Albedo do solo (fração) (modelo SWAT)
SOL_AWC	Capacidade de água disponível do solo (mm de água/mm de solo) (modelo SWAT)
SOL_BD	Massa específica do solo (g/cm <sup>3</sup> ) (modelo SWAT)
SOL_CBN	Conteúdo de carbono orgânico do solo (%peso solo) (modelo SWAT)
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada da camada (mm/h) (modelo SWAT)
SOL_Z	Profundidade da camada (mm) (modelo SWAT)
SOL_ZMX	Profundidade total (mm) (modelo SWAT)
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>

t	Tempo (dia)
TAR	Terceiro Relatório de Avaliação do IPCC
TLAPS	Taxa de lapso da temperatura (°C/km) (modelo SWAT)
T <sub>máx</sub>	Temperatura máxima diária (°C) (modelo SWAT)
T <sub>méd</sub>	Temperatura média diária (°C) (modelo SWAT)
T <sub>mín</sub>	Temperatura mínima diária (°C) (modelo SWAT)
TMPMN	Média mensal da temperatura mínima diária (°C) (modelo SWAT)
TMPMX	Média mensal da temperatura máxima diária (°C) (modelo SWAT)
TMPSTDMN	Desvio padrão da temperatura máxima diária de cada mês (°C) (modelo SWAT)
TMPSTDMX	Desvio padrão da temperatura máxima diária de cada mês (°C) (modelo SWAT)
UNFCC	Convenção das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
USLE_K	Fator de erodibilidade do solo (ton m <sup>2</sup> h/m <sup>3</sup> ton cm) (modelo SWAT)
UTM	Sistema Universal Transverso de Mercator
WXGEN	Gerador climático do modelo SWAT
w <sub>seed</sub>	Percolação no dia <i>i</i> (mm) (variável de estado do modelo SWAT)
λ	Calor latente (J kg <sup>-1</sup> )

# 1 INTRODUÇÃO

Considerando a importância econômica dos recursos hídricos no mundo e a crescente pressão sobre os mesmos, devido ao crescimento populacional, ao aumento das atividades agrícolas e às mudanças nas práticas institucionais, faz-se necessária a realização de estudos que permitam avaliar os eventuais efeitos de mudanças climáticas sobre a hidrologia em nível de bacia hidrográfica.

O uso de combustíveis fósseis tem causado um aumento antropogênico das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e outros gases de efeito estufa (GEE), aumentando a concentração desses gases na atmosfera, reduzindo a proporção de radiação solar que atinge a Terra e que é refletida de volta para o espaço e conduzindo a um aquecimento do planeta (KALNAY & CAI, 2003). Baseados nos cenários de emissão de gases de efeito estufa do *Intergovernmental Panel on Climate Change* - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), as concentrações de CO<sub>2</sub> esperadas poderiam aumentar de aproximadamente 330 a 550-970 partes por milhão, dependendo das futuras atividades humanas e do desenvolvimento tecnológico e econômico do planeta; além disso, para os cenários do IPCC, os Modelos de Circulação Geral (GCM) preveem que a maior concentração dos GEE na atmosfera aumentará a temperatura da superfície e provavelmente afetará o ciclo hidrológico (IPCC, 2007).

Além da discussão sobre a existência ou não de mudanças climáticas, tem-se a necessidade de prever tendências regionais, tais como enchentes ou secas, de forma a auxiliar o planejamento e estabelecimento de políticas sobre os recursos hídricos.

Nesta pesquisa propôs-se avaliar os eventuais efeitos das mudanças climáticas na hidrologia em uma bacia hidrográfica mediante a combinação de cenários de gases de efeito estufa derivados das saídas de Modelos de Circulação Geral (GCM) e Modelos de Circulação Regional (RCM) com modelos hidrológicos; além de detalhar os procedimentos ou encadeamentos dos modelos, o componente de inovação é a aplicação desse conjunto de sistemas de modelagem para uma bacia hidrográfica na região andina colombiana; portanto, um modo de aumentar a capacidade de previsão é o uso conjunto de modelos climáticos com modelos hidrológicos, os primeiros sendo utilizados para a previsão de precipitação e de variáveis climáticas e os últimos para estimar vazões.

Uma alternativa de ferramenta para essa avaliação é a utilização de modelos atmosféricos integrados *on-line* aos modelos hidrológicos. Porém, ainda são poucos os trabalhos que realmente integram os modelos *on-line* (com interação simultânea dos processos em ambos os sentidos, atmosfera-superfície e vice-versa); na grande maioria dos trabalhos de integração dos modelos tem sido utilizada a metodologia *off-line*, em que o modelo atmosférico fornece as precipitações para serem utilizadas como dados de entrada no modelo hidrológico (SILVA, 2005).

Um sistema de modelagem atmosfera-vazão, no qual um modelo hidrológico é acoplado a um modelo atmosférico, tornou-se uma ferramenta importante para prever precipitações e vazões, e para avaliar os impactos das mudanças ou variações climáticas sobre o ciclo hidrológico e os recursos hídricos em nível regional ou local. O acoplamento de modelos climáticos e hidrológicos produz previsões de precipitações e vazões cuja qualidade precisa ser avaliada; se as previsões de vazão forem satisfatórias, então se tem um recurso valioso para a previsão de cheias e secas e para a gestão dos recursos hídricos.

Os GCM foram conceitualmente desenvolvidos para simular a circulação atmosférica em grandes escalas e são uma ferramenta importante na avaliação das mudanças climáticas. Uma das desvantagens desses modelos é a resolução ainda grossa (dividem a atmosfera e os oceanos com grades de resolução horizontal de 2 a 4° de latitude e longitude, e 10 ou 20 camadas na vertical), que não permite obter avaliações em nível local ou regional com precisão aceitável, uma vez que não são representadas características locais, como a topografia e o uso do solo, dentre outras.

Os RCM têm a capacidade de simular variáveis climáticas mais detalhadas (em nível horário, diário, mensal) e precisas que as geradas pelos modelos globais. Os RCM utilizam as condições de contorno dos GCM para representar mais precisamente os processos que ocorrem em nível regional ou local, onde se situam as necessidades da hidrologia e das simulações hidrológicas. Os RCM capturam detalhes geográficos mais precisamente que a resolução grossa dos GCM, gerando saídas mais precisas de variáveis climáticas, que afetam o balanço hídrico das bacias hidrográficas.

Alguns RCM têm sido integrados *off-line* com modelos hidrológicas e utilizados para avaliar os efeitos das mudanças climáticas nos recursos hídricos nas bacias hidrográficas do Tejo (Espanha), Guadiana (Portugal), Chaudière (Canadá), Dokgray, Nong Pla-Lai e Klong-Yai

(Tailândia), Colorado, Carson, Sacramento, San Joaquin, Columbia e Mississippi (Estados Unidos), São Francisco e Uruguai (Brasil), dentre outras.

No presente trabalho, optou-se pelo uso do modelo *Providing Regional Climates for Impact Studies* (PRECIS) na simulação de variáveis climáticas em uma resolução de 25 km. Os dados gerados pelo RCM foram utilizados como variáveis de entrada do modelo hidrológico distribuído *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) para gerar vazões e conhecer as possíveis implicações das mudanças climáticas em uma bacia hidrográfica andina.

Assim como se observa em várias regiões do mundo, as bacias hidrográficas colombianas estão expostas aos potenciais efeitos de eventuais mudanças climáticas e aos impactos associados. Mesa *et al.* (1997) e Pabón (2006) identificaram alterações na temperatura média do ar, na precipitação, nos glaciares e nas vazões em diversas bacias hidrográficas colombianas, o que sustentaria evidências de mudanças que podem gerar reduções dos recursos hídricos para diversos propósitos.

Em função de sua importância estratégica, de sua localização (região andina) e da disponibilidade de dados, escolheu-se como estudo de caso a bacia hidrográfica do rio Coello. Essa é uma bacia não regularizada que apresenta uma alta vulnerabilidade ambiental associada a inundações, a secas e a movimentos de massa de ar que afetam de maneira contínua: as populações localizadas na bacia; a infraestrutura construída para o desenvolvimento da bacia (pontes, vias); o abastecimento de água para aproximadamente 600.000 habitantes situados nos municípios de Cajamarca, Coello, Espinal e Ibagué; a produção agrícola do distrito de irrigação mais extenso da Colômbia; e, além disso, a geração de energia.

A tese, além deste capítulo introdutório, é organizada da seguinte forma: no Capítulo 2 são apresentados os objetivos geral e específicos da pesquisa. No Capítulo 3 é apresentada a revisão bibliográfica, com os seguintes tópicos principais: 1) mudanças climáticas; 2) modelos climáticos de previsão atmosférica, com uma revisão sobre GCM e RCM, e sobre alguns estudos de modelagem climática na América do Sul; 3) modelos hidrológicos, com descrições de alguns modelos hidrológicos tradicionalmente usados neste tipo de pesquisa, em especial do modelo SWAT; 4) experiências na integração de modelos atmosféricos e hidrológicos; e 5) desafios da integração de modelos atmosféricos e hidrológicos. No Capítulo 4 estão a caracterização da bacia hidrográfica estudada, a descrição do material consultado e dos sistemas computacionais utilizados na execução deste trabalho e a

descrição das etapas metodológicas abordadas para: fornecer as condições de contorno do RCM utilizado; realizar a configuração do modelo regional e o *downscaling* dinâmico, ou redução de escala das previsões climáticas com o modelo PRECIS; realizar o processamento dos resultados do modelo regional; validar os resultados do RCM, para fazer a correção de erros sistemáticos na previsão da variável de precipitação; gerar os dados de entrada; e calibrar e validar o modelo SWAT. No Capítulo 5, os resultados da aplicação da metodologia são sintetizados. No Capítulo 6 encontram-se as conclusões do estudo e as recomendações para eventuais trabalhos futuros.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 *Objetivo geral***

O objetivo geral deste estudo foi avaliar o uso integrado de modelos atmosféricos e hidrológicos como ferramentas para prever o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica colombiana andina sob cenários de alterações climáticas.

### **2.2 *Objetivos específicos***

Os objetivos específicos do estudo foram:

- Avaliar uma metodologia para integração das previsões de precipitação dos modelos atmosféricos globais e regionais com modelos hidrológicos para gerar previsões de vazão em uma bacia hidrográfica colombiana andina com alta variabilidade climática e física;
- Quantificar a influência das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos em uma bacia hidrográfica com alta variabilidade climática e física; e
- Avaliar o desempenho de um modelo hidrológico na simulação de uma bacia hidrográfica com alta variabilidade climática e física.

## 3 REVISÃO DA LITERATURA

### 3.1 *Mudanças climáticas*

De acordo com o IPCC, as mudanças climáticas são alterações temporais do clima atribuídas à variabilidade natural e aos resultados de atividades humanas que alteram a composição da atmosfera mundial. Pode-se também adotar para o mesmo termo a definição de mudanças associadas, direta ou indiretamente, às atividades humanas que alterem a variabilidade climática natural observada em determinado período de tempo (IPCC, 2001). As mudanças climáticas, segundo Tucci & Braga (2003), são devido às atividades antrópicas e reconhecem uma ação humana que interfere na evolução do clima em nível planetário, por meio de atividades como: alteração do uso do solo pelo desmatamento e as atividades agrícolas; aumento da evaporação pela construção de reservatórios em diferentes bacias; retirada de água para usos consuntivos, dentre outros.

O IPCC considera que o aquecimento global observado nos séculos XX e XXI está associado a atividades humanas; além disso, assegura que se a emissão de GEE na atmosfera continuar no ritmo atual haverá aumentos drásticos de temperatura nas próximas décadas (IPCC, 2001).

A elevada concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera tem como origens a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento. Anualmente, mais de 6 bilhões de toneladas de carbono são liberadas na atmosfera com a queima de combustíveis fósseis; além disso, o desmatamento – para a produção de lenha, a agricultura ou a pecuária – é responsável pela redução anual de aproximadamente 9 milhões de hectares da área de florestas. O impacto dessa redução é significativo, porque as florestas armazenam 20 vezes mais carbono do que qualquer outro sistema natural (BROWN, 2003).

Segundo Marengo (2007), as evidências científicas sobre a ocorrência de mudanças do clima em nível mundial vêm despertando interesse e preocupação na sociedade, na política e na comunidade científica. A Organização Meteorológica Mundial e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente criaram, em 1988, o IPCC, com a finalidade de elaborar trabalhos científicos sobre cenários futuros de mudanças climáticas e avaliações do clima. Outra missão do IPCC é avaliar a informação científica, técnica e socioeconômica, relevante para entender os riscos induzidos por mudanças climáticas na população humana.

O efeito estufa vem aumentando a temperatura média da Terra e é consequência da absorção eficiente de radiação infravermelha por constituintes da atmosfera; além disso, a concentração de alguns gases de efeito estufa tem aumentado como consequência das atividades humanas (SILVA & GUETTER, 2003).

Um incremento na concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera mudará o sistema climático mundial, gerando aumentos na temperatura média do ar, alterações dos padrões espaciais e temporais da precipitação. As mudanças climáticas podem gerar efeitos significativos sobre a água doce, a temperatura da água doce, o escoamento, os fluxos de nutrientes d'água e os regimes de vazões dos rios (WATSON *et al.*, 1996).

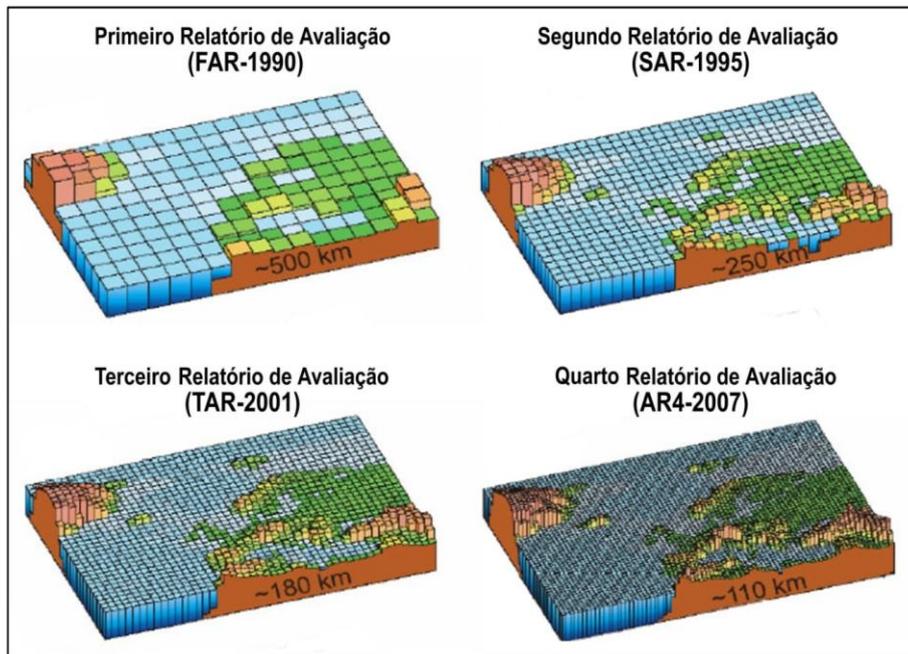
O IPCC defende a hipótese de que o aquecimento global, em grande parte, é produzido pelas emissões de GEE, derivadas da queima de combustível fóssil e mudanças nos usos do solo devido às atividades humanas. O conhecimento produzido em relação às mudanças climáticas se apresenta em forma de relatórios de avaliação, que são reconhecidos como as fontes de informação mais confiáveis sobre a mudança do clima. Em 1990 foi concluído o Primeiro Relatório de Avaliação (FAR) do IPCC, com a sugestão de concepção de uma instância de negociação política sobre mudanças climáticas, o que culminou com a criação da Convenção das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC).

No Segundo Relatório de Avaliação (SAR), finalizado em 1995, foi proposta uma estratégia de mitigação de emissões de CO<sub>2</sub> (principal fonte do efeito estufa); dois anos depois foi incluída no âmbito da UNFCCC uma nova área temática de questões técnicas relacionadas com os aspectos econômicos da mudança do clima.

No Terceiro Relatório de Avaliação (TAR), concluído em 2001, o IPCC apresentou fortes evidências de que a ação do homem é a maior causa do aquecimento global observado na segunda metade do século XX (IPCC, 2001). O TAR projetou para os 100 anos seguintes cenários alarmantes de aumento da temperatura média global e aumento no nível dos mares causado pela expansão dos oceanos e pelo derretimento das calotas polares.

No Quarto Relatório de Avaliação (AR4), publicado em 2007, foi aumentado o nível de confiabilidade em relação ao relatório anterior, com a indicação de que é muito provável que a maior parte da elevação da temperatura global média (desde meados do século XX) possa ser explicada pelo aumento das concentrações de gases de efeito estufa associado às atividades antrópicas.

Na Figura 3.1 apresenta-se uma ilustração esquemática das características de resolução geográfica das gerações de modelos climáticos utilizados nos citados relatórios do IPCC: FAR, SAR, TAR e AR4.



**Figura 3.1** – Resolução geográfica das gerações de modelos climáticos utilizados nos relatórios do IPCC (Fonte: adaptada de IPCC, 2007)

Segundo Trenberth (2007), o quarto relatório científico do IPCC traz evidências de mudanças do clima que podem afetar significativamente o planeta, especialmente nos extremos climáticos, com maior rigor nos países menos desenvolvidos na região tropical. As principais conclusões desse relatório indicam que o aquecimento global dos 50 anos anteriores é causado pelas atividades humanas.

De acordo com Eerola (2003) um dos maiores desafios científicos da atualidade é o aquecimento global que é provocado pela emissão de gases de efeito estufa. Os debates em torno das possíveis consequências das eventuais mudanças climáticas são intensos. A maioria dos governos e o IPCC consideram que o efeito estufa é causado pelas atividades antrópicas e exigem sua limitação. Por outro lado estão os que defendem as emissões das atividades industriais de acordo com seus interesses e mentalidade do liberalismo econômico; além disso, para esse autor, as previsões e simulações do IPCC têm vários problemas, entre os quais se podem destacar: as simulações e previsões são baseadas em suposições, e ainda não são conhecidos todos os fatores e interações que influenciam o clima (não são conhecidos por completo, por exemplo, as ações do vapor d'água, das nuvens e da vegetação no ciclo do carbono e na reflexão da radiação solar). A disponibilidade de

medições de temperatura só para os últimos 100 anos é insuficiente para a validação dos cenários futuros de mudanças climáticas.

Segundo Merritts *et al.* (1997) *apud* Eerola (2003), em uma perspectiva global e de tempo geológico a ação humana pode ser considerada depreciável no aquecimento global; além disso, quando os combustíveis fósseis estiverem totalmente esgotados, as consequências do efeito estufa serão passageiras na escala de tempo geológico e a Terra novamente se esfriará com uma nova glaciação.

As projeções de mudança na distribuição da chuva para climas mais quentes no futuro, obtidas dos modelos globais do AR4, não são conclusivas e as incertezas, dependentes dos modelos e das regiões consideradas, são grandes (MARENGO, 2008).

Molion (2007) afirma que a variabilidade natural do clima não permite concluir que o aquecimento global, sugerido no AR4, seja derivado da intensificação do efeito estufa causada pelas atividades humanas ou mesmo que essa tendência de aquecimento persista nas próximas décadas; além disso, afirma que dados paleoclimáticos obtidos pela estação de Vostok mostram que as temperaturas do ar estiveram mais elevadas que as atuais nos períodos interglaciais anteriores e que as concentrações de CO<sub>2</sub> não estiveram acima de 300 partes por milhão por volume, sugerindo que o aquecimento do clima não depende da concentração de dióxido de carbono. O mesmo autor ainda ressalta que as previsões realizadas para os próximos 100 anos podem estar superestimadas e que a hipótese do aquecimento gerado pelo efeito estufa (aceita pela maioria, segundo se afirma) pode não ter fundamento sólido, já que os resultados de modelos (um de seus três argumentos básicos) utilizados em defesa da hipótese do aquecimento global antropogênico apresentam problemas como: os modelos atuais são representação ainda simples e grosseira da complexa interação entre os processos físicos diretos e de realimentação que controlam o clima da Terra; os modelos carecem de validação de seus resultados; e os modelos não simulam o papel do ciclo hidrológico como termostato do sistema terra-atmosfera.

Chapman (2008), outro cético das mudanças climáticas, afirma que as temperaturas médias da Terra se mantiveram estáveis ou ligeiramente declinantes na década passada, apesar do aumento contínuo da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera; além disso, afirma que existe uma estreita correlação entre as variações no ciclo das manchas solares e o clima da Terra que os pesquisadores ainda não estudaram de forma suficiente.

Segundo Pielke *et al.* (1999), alterações no uso do solo devido às atividades humanas poderiam induzir modificações do clima, em escala regional e local, de magnitude semelhante às mudanças climáticas observadas durante o século passado.

As mudanças climáticas naturais, segundo Silva & Guetter (2003), aconteceram no passado na ausência de seres humanos e geraram variações climáticas intensas; essa afirmação é sustentada pelas séries de dados reconstruídos a partir de informações geológicas. Além disto, o estudo permitiu observar que alguns municípios do estado do Paraná têm apresentado uma aceleração do ciclo hidrológico a partir de 1970, o que pode ser constatado por meio do aumento da frequência de chuvas mais intensas, do aumento de vazões médias e da ocorrência de estiagens com maior duração.

Segundo Marengo (2008), o continente sul-americano já experimentou chuvas torrenciais na Venezuela, inundações nos pampas argentinos, secas na Amazônia, tempestades de granizo na Bolívia e uma temporada recorde de furacões no Caribe. Além disso, as chuvas diminuem no Chile, no sul do Peru e nordeste da Argentina. Com o aumento de temperaturas já registradas, os glaciares andinos estão retrocedendo. Com respeito às vazões dos rios, as chuvas observadas refletem bem as previsões na precipitação, com uma clara tendência de aumento nas vazões do rio Paraná e outros rios no Sudeste da América do Sul.

Segundo Silva & Guetter (2003), no setor andino da América Latina, grande parte da precipitação ocorre na forma de neve durante o inverno, sendo acumulada nas regiões mais altas. O umedecimento das planícies e áreas mais baixas dessa região ocorre durante o verão, por meio do derretimento da neve nas regiões altas e o posterior escoamento da água para as partes mais baixas; dessa forma, alterações no regime de precipitação provocariam forte impacto socioeconômico local na região.

De acordo com Binder (2006), na região nordeste do Pacífico há indícios dos efeitos das mudanças climáticas nas precipitações, com aumento no inverno e diminuição no verão e na primavera. Essas mudanças refletem-se na disponibilidade hídrica das bacias hidrográficas dessa região dos Estados Unidos.

Segundo Cunha *et al.* (2008), as alterações climáticas afetam os recursos hídricos tanto na oferta como na procura de água; na oferta, as alterações climáticas modificam o regime de precipitações e geram variações temporais e espaciais na disponibilidade e qualidade d'água (superficial e subterrânea). Com respeito à procura de água, se esperam aumentos no

consumo, sobretudo nos setores de irrigação e geração de energia, devido ao aumento das necessidades de refrigeração; as situações de cheia e secas são outro impacto nos quais as mudanças climáticas têm influência direta.

Os efeitos das mudanças na cobertura vegetal (desmatamento, incêndios florestais) e das mudanças climáticas em biomas da América do Sul podem gerar a substituição dos bosques tropicais da Amazônia por savanas e o aumento das zonas áridas no nordeste do Brasil (SALAZAR *et al.*, 2007).

Um aumento da concentração de GEE pode alterar o equilíbrio radiativo na atmosfera, gerando um aumento da temperatura, e mudanças nas precipitações e nos padrões climáticos; dos potenciais impactos de eventuais mudanças climáticas destacam-se as variações na disponibilidade de água, que poderão afetar em quase todos os aspectos o bem-estar humano, a produtividade agrícola, a ocorrência de secas e inundações, e o fornecimento de água para o consumo humano (IPCC, 2001). Com respeito à evapotranspiração, o efeito imediato poderá ser um aumento na capacidade do ar em absorver água na medida em que se aumenta a temperatura. A tendência de incremento da temperatura superficial pode impactar o ciclo hidrológico em vários processos em nível de bacia hidrográfica, com geração de variações no escoamento superficial, na evapotranspiração e nas taxas de sedimentação (CHANG *et al.*, 2001).

Segundo Stern (2006), uma extensa série de provas relacionadas aos possíveis impactos das mudanças climáticas tem sido avaliada; além disso, foram utilizadas diferentes técnicas de avaliação econômica para determinar os custos e riscos derivados das mudanças climáticas; o mesmo autor conclui que os benefícios de ações enérgicas e imediatas superam os custos econômicos da inação. As mudanças climáticas afetarão os elementos básicos da vida de pessoas de todas as partes do mundo (acesso à água, produção de alimentos, meio ambiente, saúde, dentre outros). As consequências previstas para os aumentos da temperatura global são apresentadas a seguir:

- Aumento de 1 °C na temperatura da Terra: desaparecimento das pequenas geleiras nos Andes, o que ameaça o fornecimento de água para aproximadamente 50 milhões de pessoas; diminuição da produção de cereais nas zonas temperadas; ao menos 300 mil pessoas morrerão por ano devido a doenças relacionadas com as alterações climáticas.

- Aumento de 2 °C na temperatura da Terra: diminuições de 20 a 30% na água disponível em algumas regiões do sul da África e da África mediterrânea, redução de 5 a 10% na colheita de cereais na África tropical; de 40 a 60 milhões de pessoas estarão expostas à malária na África; 10 milhões de pessoas a mais expostas a enchentes; entre 15 e 40% das espécies de seres vivos ameaçadas de extinção; risco de extinção das espécies do Ártico (urso polar); e possibilidade de derretimento da camada de gelo da Groelândia de forma irreversível, elevando o nível dos oceanos em aproximadamente 7 metros.
- Aumento de 3 °C na temperatura da Terra: entre 1 e 4 bilhões de pessoas a mais enfrentando períodos de escassez de água; períodos de seca pronunciada a cada dez anos no sul da Europa; entre 150 a 550 milhões de pessoas a mais expostas a padecer de fome; entre 1 e 3 milhões de pessoas a mais sujeitas à desnutrição; colapso da floresta Amazônica (de acordo com alguns modelos); aumento do risco de colapso da camada de gelo da Antártida Ocidental; e elevação do risco de mudanças bruscas na circulação atmosférica (no mecanismo das monções).
- Aumento de 4 °C na temperatura da Terra: diminuições entre 30 e 50% na disponibilidade de água no sul da África e na África mediterrânea; queda entre 15 e 35% das safras de produtos agrícolas na África e Austrália; aproximadamente 80 milhões de pessoas a mais expostas à malária na África; e perda de cerca de metade da vegetação de tundra no Ártico.
- Aumento de 5 °C na temperatura da Terra: possível desaparecimento de grandes geleiras no Himalaia, afetando um quarto da população da China e milhões dos moradores da Índia; e aumento do nível dos oceanos, o que ameaça pequenas ilhas e as áreas costeiras (estado da Flórida), e grandes cidades, como Nova York, Londres e Tóquio.

Avaliar os efeitos das mudanças climáticas em nível de bacia hidrográfica passa pelo uso de modelos; tradicionalmente, as fases atmosféricas e terrestres do ciclo hidrológico são representadas e simuladas por modelos independentes. Nos últimos anos, essas simulações têm sido acopladas com base na concatenação de modelos atmosféricos (modelos de circulação geral e modelos de circulação regional) e hidrológicos (BRAGA *et al.*, 2005).

No acoplamento, o modelo de circulação geral fornece as condições de contorno para que o modelo de circulação regional gere os dados meteorológicos a serem usados como dados de entrada do modelo hidrológico. De acordo com Braga *et al.* (2005), o acoplamento

unidirecional apresenta uma maior flexibilidade para a integração entre os modelos de circulação regional e hidrológicos.

No encadeamento de modelos hidrológicos e climáticos, o hidrológico, de tipo chuva-vazão, além de representar a fase do ciclo hidrológico entre a precipitação e o escoamento em um ponto de interesse, apresenta um grande potencial para avaliar efeitos de mudanças climáticas em nível de bacia hidrográfica.

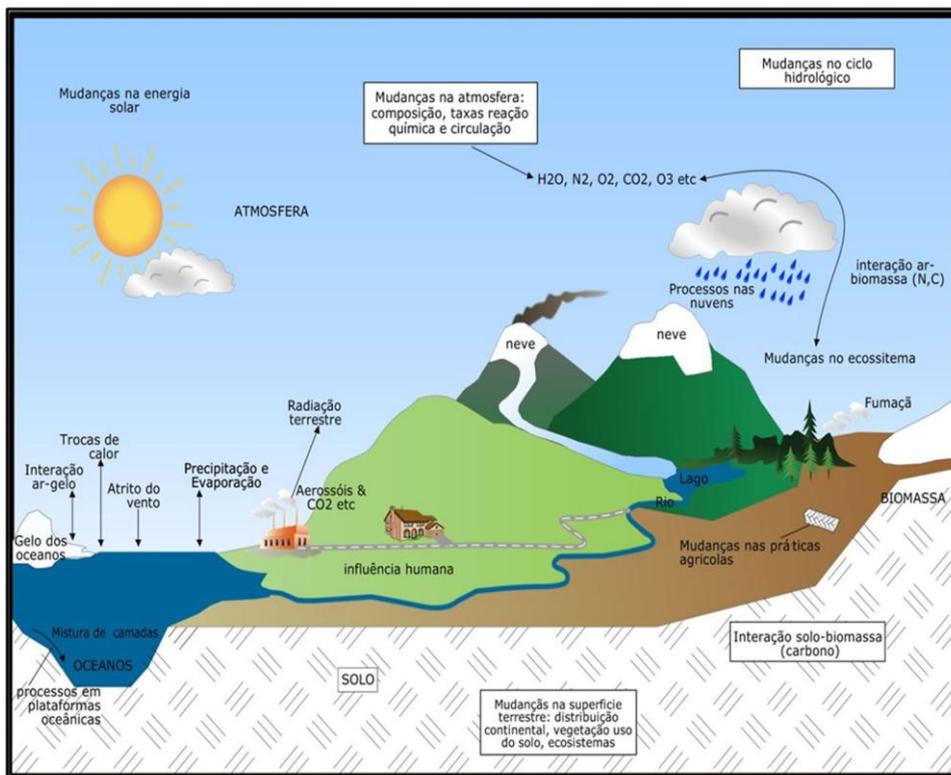
No tópico a seguir serão descritos, de forma mais detalhada, alguns aspectos concernentes a esses modelos matemáticos que são utilizados para avaliar os efeitos das mudanças climáticas em nível de bacia hidrográfica.

### **3.2 Modelos dinâmicos de previsão atmosférica**

Segundo Tucci & Braga (2003), na atualidade a comunidade científica internacional vem utilizando os Modelos de Previsão Atmosférica como o método mais apropriado para realizar previsões do clima para o mundo. Na realização dos prognósticos são empregados modelos que simulam os processos atmosféricos em computadores de alto desempenho. Os modelos atmosféricos são ferramentas importantes para gerar cenários das mudanças do clima, como consequência de futuros cenários de forçantes climáticas, correspondentes aos cenários de gases de efeito estufa.

Os modelos de previsão atmosférica são ferramentas desenvolvidas para melhorar o entendimento do sistema climático e auxiliar a previsão do clima futuro. Na atualidade existe uma ampla gama de modelos climáticos disponíveis (que representam por meio de equações físicas os processos que compõem a atmosfera e o sistema climático) com uma variedade de aplicações, úteis para realizar simulações associadas a compreender o sistema climático e a prever as futuras mudanças climáticas (MCGUFFIE & HENDERSON-SELLERS, 2001). Na Figura 3.2 é apresentado esquematicamente o sistema climático, seus componentes e suas interações.

No processo de desenvolvimento dos modelos de previsão atmosférica, a atmosfera foi o primeiro componente a ser simulado; devido à baixa densidade e à facilidade de movimento é o subsistema do clima mais difícil de modelar. A modelagem da precipitação é a maior dificuldade devido às incertezas da dinâmica das nuvens para as escalas espaciais e temporais dos modelos de circulação geral.



**Figura 3.2 – Sistema climático, componentes e interações (Fonte: Silva, 2005)**

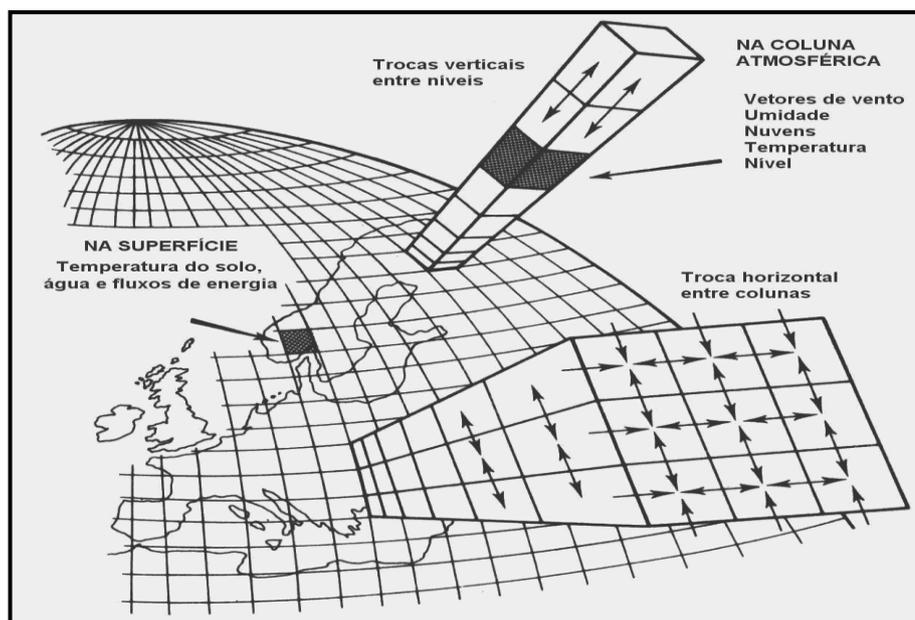
A classificação dos modelos de circulação atmosférica depende da definição do clima (global, regional, local) e da modelagem que realizam. O acoplamento dos componentes das interações oceano-atmosfera representa um grande desafio devido às diferenças de escalas temporais e espaciais dos processos físicos de cada subsistema, e ao fato de que o acoplamento atmosfera-oceano é extremamente dependente da latitude (MCGUFFIE & HENDERSON-SELLER, 2001).

No tópico seguinte será descrita de forma mais detalhada a distinção entre os GCM, que simulam todo o globo, e os RCM, que simulam em maior detalhe áreas com escalas próximas àquelas consideradas em hidrologia. Essas simulações da circulação atmosférica são realizadas a partir de modelos climáticos globais e regionais, nos quais se inserem, particularmente, os trabalhos desenvolvidos pelo IPCC.

### 3.2.1 Modelos de Circulação Geral (GCM)

Os modelos de circulação geral são as principais ferramentas para estudar a variabilidade climática e os efeitos das mudanças climáticas em longo prazo; mais ainda, esses modelos têm uma resolução grossa que apresenta limitações na simulação em nível de mesoescala para representar processos como o uso do solo, a topografia e as interações terra-oceano (CHOU *et al.*, 2012; COSTA *et al.*, 2012).

Segundo Wigley *et al.* (1990) *apud* Xu (1999), os modelos de circulação geral têm sido desenvolvidos para simular o clima presente e prever as mudanças climáticas futuras. Os GCM são modelos matemáticos tridimensionais no espaço nos quais são considerados os principais processos que governam os movimentos da atmosfera e dos oceanos; para isso, é resolvida uma série de equações que descrevem os fluxos de energia, a quantidade de movimento, a conservação de massa e as leis dos gases. Os GCM dividem a superfície terrestre em uma grade horizontal regular, com várias camadas verticais na atmosfera e nos oceanos (Figura 3.3), e o conjunto de equações é resolvido para essa grade tridimensional, usando técnicas numéricas (MCGUFFIE & HENDERSON-SELLER, 2001).



**Figura 3.3** – Discretização espacial das características básicas e processos dos GCM  
(Fonte: Silva, 2005)

Geralmente os GCM são utilizados para simular o clima presente e projetar o clima futuro, com forçantes de gases de efeito estufa e aerossóis; a atmosfera e o oceano são normalmente divididos em grades horizontais com resolução de 2 a 4° de latitude e longitude, com 10 a 20 camadas na vertical; a maioria dos GCM simula processos na escala global ou continental e garante uma representação razoavelmente precisa da média climática planetária. Nas últimas décadas, foi ampliada a capacidade dos GCM para simular o clima presente e passado em escalas globais. Além disso, esses modelos são incapazes de representar as características locais (DIBIKE & COULIBALY, 2005).

Uma das maiores desvantagens dos modelos globais é a resolução espacial, que pode ser da ordem de centenas de quilômetros, de modo que os forçantes de mesoescala – topografias complexas, cobertura vegetal, grandes lagos e rios, e alguns processos físicos (radiação,

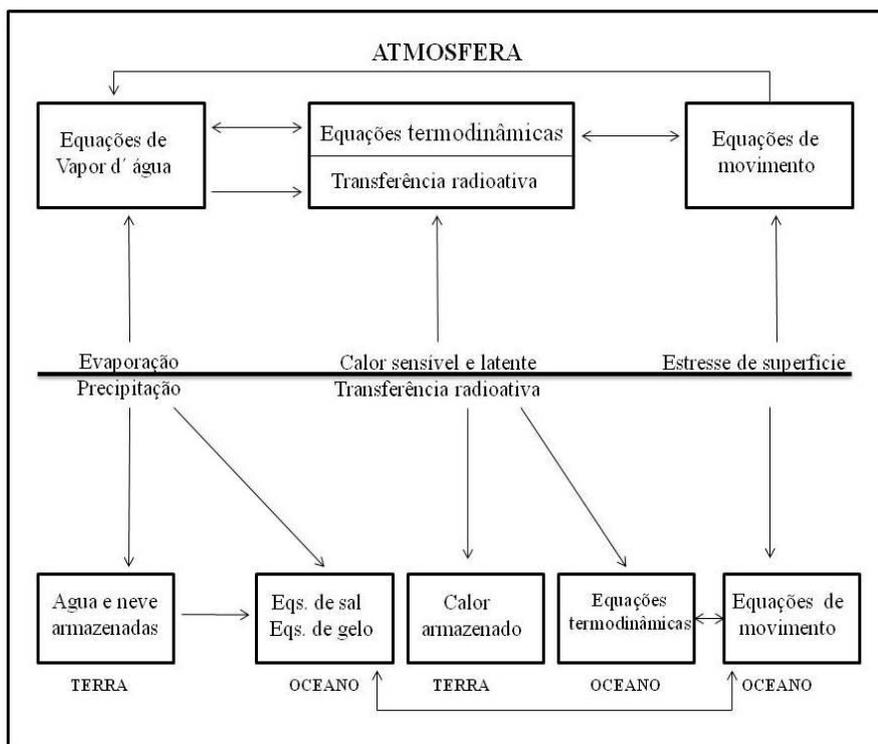
convecção), com escalas espaciais inferiores à resolução espacial da “grade” do modelo – são mal representados e, por isso, limitam a possibilidade de simular ou prever com exatidão algumas variações, como a da temperatura ou a da precipitação, em escala regional. Segundo Wigley *et al.* (1990) *apud* Xu (1999), os GCM apresentam habilidades para representar as escalas continentais e globais, mas havia problemas para representar as características e dinâmicas que acontecem em nível regional ou local. E esses problemas ainda não foram completamente superados nos dias atuais.

De acordo com Bhaskaran *et al.* (1996), a forte relação da precipitação com a orografia é resolvida adequadamente pelos GCM. Porém, uma de suas limitações é que os GCM requerem uma capacidade muito alta de infraestrutura computacional, o que os torna economicamente custosos.

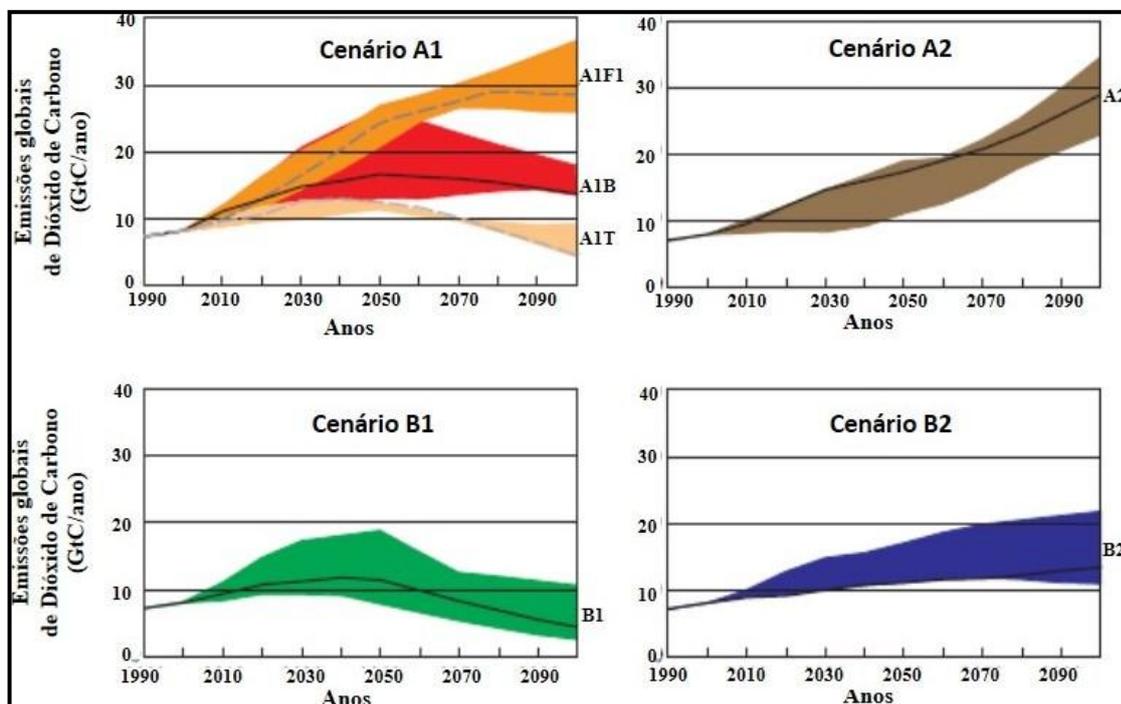
Segundo Gewex (1998) *apud* Silva (2005), as aplicações de modelos globais em estudos de recursos hídricos apresentam algumas limitações, entre as quais se podem destacar: a) a discretização, que retrata somente os processos atmosféricos de macroescala na superfície da Terra; e b) os muitos processos, que representam fortes limitações nos modelos, como os processos hidrológicos, que variam na microescala.

Para Kimura (2002), desde 1988 o aquecimento global da atmosfera devido ao aumento da concentração de CO<sub>2</sub> é uma preocupação da sociedade mundial e uma importante questão política; como a atmosfera e os oceanos estão conectados é necessária a utilização de modelos acoplados oceano-atmosfera para prever o clima. Na Figura 3.4 mostra-se uma representação esquemática dos principais processos modelados pelos GCM e as formas de interação entre a atmosfera, os oceanos e a superfície terrestre. Os GCM estão baseados em representações simplificadas, chamadas de parametrizações, dos conhecimentos nos campos da física, química, biologia, economia e ciências sociais.

A informação sobre os cenários futuros de emissão de gases de efeito estufa, obtidos do *Special Report on Emissions Scenarios*, os quais foram utilizados pelo IPCC no AR4, está contida nas saídas dos modelos de circulação geral (IPCC, 2001; IPCC, 2007). Esses cenários do IPCC representam a informação mais atual do que poderia acontecer no futuro, em uma combinação de desenvolvimento econômico, tecnológico, social, demográfico e de emissões de GEE. As linhas evolutivas qualitativas proporcionam quatro conjuntos de cenários denominados *famílias*: A1, A2, B1 e B2 (NAKICENOVIC *et al.*, 2000). Na Figura 3.5 mostra-se a representação dos cenários de emissão de gases de efeito estufa do IPCC.



**Figura 3.4** – Interações entre atmosfera, oceanos e continentes, representadas pelos modelos globais (Fonte: Silva, 2005)



**Figura 3.5** – Emissões globais anuais de CO<sub>2</sub> de todas as fontes, em gigatoneladas de carbono por ano (GtC/ano), para os cenários A1, A2, B1 e B2 (Fonte: adaptada de NAKICENOVIC *et al.*, 2000)

Segundo Parry *et al.* (2007), os métodos de redução de escala são cada vez mais utilizados para produzir cenários climáticos de alta resolução, baseados nas projeções dos GCM. Uma diversidade de métodos de redução de escala tem sido empregada na geração de cenários de

emissão de gases de efeito estufa, permitindo definir novos cenários regionais das condições socioeconômicas, de uso do solo, do clima atmosférico e do nível do mar.

As saídas dos modelos climáticos globais ou regionais contêm informações sobre os quatro cenários (A1, A2, B1 e B2) estabelecidos pelo IPCC, os quais foram construídos para explorar futuros desenvolvimentos no meio ambiente global, com especial referência à produção de gases efeito estufa e às emissões de aerossóis. As características gerais de cada cenário estão apresentadas a seguir (IPCC, 2000):

- **Cenário A1:** cenário que descreve um mundo futuro de crescimento econômico muito rápido, onde a globalização é dominante e o crescimento populacional pequeno, com desenvolvimento de tecnologias novas e mais eficientes. Os temas a melhorar são a convergência e a interação entre regiões, a capacidade de construir e o aumento de interações culturais e sociais, com redução significativa nas diferenças regionais e renda *per capita*. Neste cenário, os indivíduos procuram riqueza pessoal, em vez de qualidade ambiental. São três os subcenários: A1B (cenário de estabilização ou um equilíbrio entre todas as fontes, em que o equilíbrio é definido como não depender muito de uma determinada fonte de energia, supondo-se que taxas similares de aperfeiçoamento se apliquem a todas as tecnologias de oferta de energia e uso final); A1F (uso máximo de combustível fóssil); e A1T (uso reduzido de combustível fóssil).
- **Cenário A2:** o mundo que descreve é muito heterogêneo e a regionalização é dominante. A discussão fundamental é a preservação de identidades culturais regionais. Outras características deste cenário são o crescimento populacional alto e a ausência de preocupação em relação ao desenvolvimento econômico rápido.
- **Cenário B1:** é caracterizado por apresentar um pequeno crescimento populacional, mudanças rápidas na estrutura econômica e introdução de tecnologias limpas. A ênfase deste cenário está em apoiar as soluções globais de sustentabilidade econômica, social e ambiental, incluindo esforços combinados para o desenvolvimento de tecnologia rápida e eficiente.
- **Cenário B2:** a ênfase está em soluções locais para garantir a sustentabilidade econômica, social e ambiental. Além disso, a mudança tecnológica é mais diversificada, com forte ênfase nas iniciativas comunitárias e inovação social, em lugar de soluções globais.

Para o ano 2100 são projetadas concentrações de CO<sub>2</sub> decorrentes da emissão antropogênica de gases de efeito estufa e aerossóis, para os cenários A1F, A2, A1B, B2, A1T e B1, de cerca de 1.550, 1.250, 850, 800, 700 e 600 partes por milhão, respectivamente. Os cenários caracterizados por apresentar as taxas mais elevadas de gases de efeito estufa na atmosfera (cenários pessimistas) são os A1F, A2 e A1B, enquanto que os cenários com as taxas mais baixas de GEE na atmosfera (cenários otimistas) são os B2, A1T e B1.

Dentre os GCM mais utilizados nas simulações do IPCC, juntamente com as instituições onde os modelos foram rodados, podem ser destacados: *Hadley Centre for Climate Prediction and Research* (HadCM3), do Reino Unido; *Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization* (CSIRO-Mk2), da Austrália; *Canadian Center for Climate Modeling and Analysis* (CCCMA), do Canadá; *National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA-Geophysical Fluids Dynamic Laboratory* (GFDL-CM2), dos Estados Unidos da América; e *Center for Climate Studies and Research CCSR/National Institute for Environmental Studies NIES* (CCSR/NIES), do Japão.

Segundo Gordon *et al.* (2000), a componente atmosférica do modelo HadCM3 tem 19 níveis, com uma resolução horizontal de 2,5° de latitude e 3,75° de longitude, que produz uma grade global de 96 x 73 células. Isso é equivalente a uma resolução de superfície de cerca de 417 km x 278 km na linha do Equador, reduzindo até 295 km x 278 km a 45° de latitude (comparável a uma resolução espectral de T42). A componente oceânica do modelo HadCM3 tem 20 níveis com uma resolução horizontal de 1,25° x 1,25°; algumas mudanças desse modelo com respeito à versão anterior são descritas na sequência: foi incluído um novo esquema de radiação que tem 6 bandas espectrais em onda curta que representa o efeito de gases de efeito estufa; o esquema de convecção foi melhorado pela adição de uma parametrização do impacto direto da convecção; um novo esquema de superfície inclui a representação do congelamento e derretimento da umidade do solo; e a formulação da evaporação inclui a dependência da resistência estomática em relação à temperatura, pressão de vapor e CO<sub>2</sub>.

Para Gordon *et al.* (2000) e Collins *et al.* (2001), o modelo HadCM3 não precisa de ajustes nos fluxos de energia para gerar boas simulações; o modelo tem sido utilizado para simular 1.000 anos ou mais e não se observaram derivas ou *drifts*.

Segundo Viale (2005), o processo para estabelecer uma série de dados como condições iniciais de um modelo operativo de prognóstico tem sido uma parte integral das primeiras

rotinas das previsões numéricas; essas séries de dados são as análises em pontos de grade, as quais representam o estado da atmosfera em um tempo particular e são a base de muitas pesquisas meteorológicas. Mudanças nos modelos operativos e nas técnicas de manejo de dados, a disponibilidade de dados, o sistema operativo de assimilação de dados globais, dentre outros, interrompia a continuidade das análises, limitando o verdadeiro sinal da mudança climática de curto prazo e/ou a variabilidade climática interanual; para evitar esse problema, convém definir um sistema de assimilação de dados e utilizá-lo desde o passado até o presente, em procedimento que gera o que se chama de reanálise. Hoje, o termo reanálise é difundido e conhecido; além disso, o uso de dados de reanálise é uma rotina frequentemente utilizada em pesquisas meteorológicas potencias, mas isso foi uma conquista decorrente de uma política de disponibilização de dados de qualidade de forma gratuita, simples (internet) e amigável.

Segundo Vincent *et al.* (2005), o uso de dados climáticos de reanálise passou a ser uma importante ferramenta na realização de estudos climáticos, especialmente em regiões com escassez ou ausência de observações de dados climáticos ou onde são requeridos dados com uma maior resolução espaço-temporal. De acordo com Kalnay *et al.* (1996), os dados de reanálise algumas vezes não representam bem os dados reais, sendo necessário que se façam análises comparativas entre dados observados e de reanálise com o objetivo de melhor compreender as incertezas inerentes ao processo.

Segundo Rodriguez (2010), o *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) e o *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) têm origem no projeto denominado *Climate Data Assimilation System* e seu objetivo foi criar um sistema de assimilação e prognóstico de dados. A reanálise do NCAR/NCEP é um projeto de reconstrução histórica do clima em diferentes períodos incluindo observações em distintas escalas de tempo e espaço.

De acordo com Kalnay *et al.* (1996) e Reid *et al.* (2001), os dados de reanálise do NCEP/NCAR estão constituídos por campos de temperatura do ar, umidade relativa e específica em toda a camada da troposfera, ventos zonal e meridional para os níveis de 1.000 hPa, 850 hPa e 500 hPa, pressão ao nível do mar, dentre outros, com resolução espacial de 2.5° x 2.5° e temporal de 6 horas; devido à sua ampla utilização, é conveniente verificar se os dados de reanálise do NCEP/NCAR reproduzem o comportamento médio e ciclo anual (a climatologia) nas regiões de interesse. Para a América do Sul, os valores de reanálise podem

conter erros sistemáticos, motivo pelo qual essa validação se faz necessária (COSTA & FOLEY, 1998).

Segundo Uppala *et al.* (2005), o projeto de reanálise ERA-40, do Centro Europeu de Prognóstico do Tempo – *European Center for Medium-Range Weather Forecast*, foi criado com o objetivo de produzir e promover o uso de um conjunto de análises globais que descrevem o estado da atmosfera, a Terra e as condições de forçamento oceânico; as observações utilizadas em ERA-40 foram acumuladas a partir de muitas fontes (satélites, aeronaves, boias no oceano, observações terrestres, dentre outras). Os dados ERA40 apresentam duas resoluções espectrais: resolução horizontal aproximada de 125 km, com 31 níveis na vertical; resolução horizontal aproximada de 39 km, com 50 níveis na vertical. A resolução horizontal é de  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  com uma resolução temporal de 6 horas.

### **3.2.2 Modelos de Circulação Regional (RCM)**

Segundo O'Brien *et al.* (2011), os RCM têm sido utilizados para a redução de escala, gerar informação de alta resolução ou realizar simulações climáticas em diferentes regiões do mundo. O êxito dos RCM na simulação de fatores climáticos regionais decorre da geração de informação para uma resolução espacial mais fina e com custos computacionais baixos.

Um RCM é um modelo de alta resolução que cobre uma área limitada da Terra e se baseia em leis físicas representadas por equações matemáticas, que são resolvidas utilizando uma grade tridimensional. Usualmente um RCM inclui a atmosfera, os componentes da superfície terrestre e o sistema climático, e contém representações de processos importantes dentro do sistema climático como: nuvens, radiação, precipitação e hidrologia do solo (JONES *et al.*, 1995).

Segundo Marengo *et al.* (2012), as projeções derivadas dos RCM podem ser consideradas úteis nos estudos de avaliação dos impactos das mudanças climáticas em nível regional; além disso, em muitos trabalhos nacionais e internacionais os RCM têm sido utilizados com a finalidade de quantificar as mudanças climáticas e proporcionar cenários climáticos regionais para avaliar a vulnerabilidade as mudanças climáticas.

Os modelos de circulação regional por meio da redução de escala utilizam as saídas dos modelos gerais como condições iniciais e de contorno para gerar simulações climáticas espacialmente mais detalhadas para uma área de interesse ( $20\text{-}50 \text{ km}^2$ ); os RCM capturam detalhes geográficos em forma mais precisa que os GCM. Além disso, os requerimentos

computacionais dos RCM são exigentes, mas os avanços na capacidade dos computadores têm feito desses modelos uma ferramenta muito útil em estudos climatológicos em nível regional (WILBY *et al.*, 2002; HAY & CLARK, 2003).

Os modelos climáticos regionais são rodados para resoluções horizontais mais finas do que as dos modelos de circulação geral. Embora a representação dos componentes do modelo (topografia, física das nuvens) seja melhor, os RCM ainda apresentam erros similares aos dos GCM (HAY *et al.*, 2002; HAY & CLARK, 2003). Os melhores resultados são explicados pela melhor representação física, por parte dos modelos regionais, das características geográficas e dos processos que ocorrem na escala das bacias hidrográficas.

Para Giorgi *et al.* (2001), a técnica de *downscaling* dinâmico é a transferência da informação gerada pelos GCM para escalas menores. A utilização dessa técnica a partir de um RCM mostrou-se ser uma ferramenta promissora para reproduzir o detalhe regional das características climáticas forçadas pela topografia e o uso do solo. Com a finalidade de se melhorar as previsões em escala regional utilizam-se as técnicas de transferência da informação gerada pelos GCM em larga escala para escalas menores, a partir de modelos climáticos regionais (VARIS *et al.*, 2004).

O *downscaling* é uma técnica de se obter informação desde a integração de modelos de circulação geral de resoluções grossas com modelos regionais ou modelos estatísticos, para produzir informação adequada para estudos de bacias hidrográficas ou mesoescala (ZORITA & VON STORCH, 1999). Os métodos de *downscaling* podem ser classificados em dinâmico e estatístico:

- ***Downscaling* dinâmico:** um RCM usa saídas de um GCM como condições de contorno e iniciais para detalhar as variáveis que afetam o balanço hídrico e energético sobre uma região de interesse (HAY *et al.*, 2002). O RCM captura detalhes geográficos que são ignorados na resolução grossa dos GCM e gera saídas de dados climáticos mais precisos; além disso, os requerimentos computacionais do *downscaling* dinâmico se beneficiam dos rápidos avanços na potência dos computadores (WILBY *et al.*, 1999).
- ***Downscaling* estatístico:** o preditor de variáveis atmosféricas em grande escala e/ou características de circulação está relacionado às séries meteorológicas (KIM *et al.*, 1984; VON STORCH *et al.*, 1993). O método *downscaling* estatístico pode ser classificado no uso de técnicas (WILBY & WIGLEY, 1997) ou na eleição do preditor de variáveis

(RUMUKAINEN, 1997). O método estatístico básico é frequentemente criticado pela invariância dos parâmetros estocásticos sob mudanças climáticas. O enfoque *downscaling* estatístico é utilizado para gerar algoritmos regionais hidrológicamente úteis, o que é muito importante no conhecimento de cenários de mudanças climáticas globais e para avaliar impactos regionais (GROTCH & MACCRAKEN, 1991).

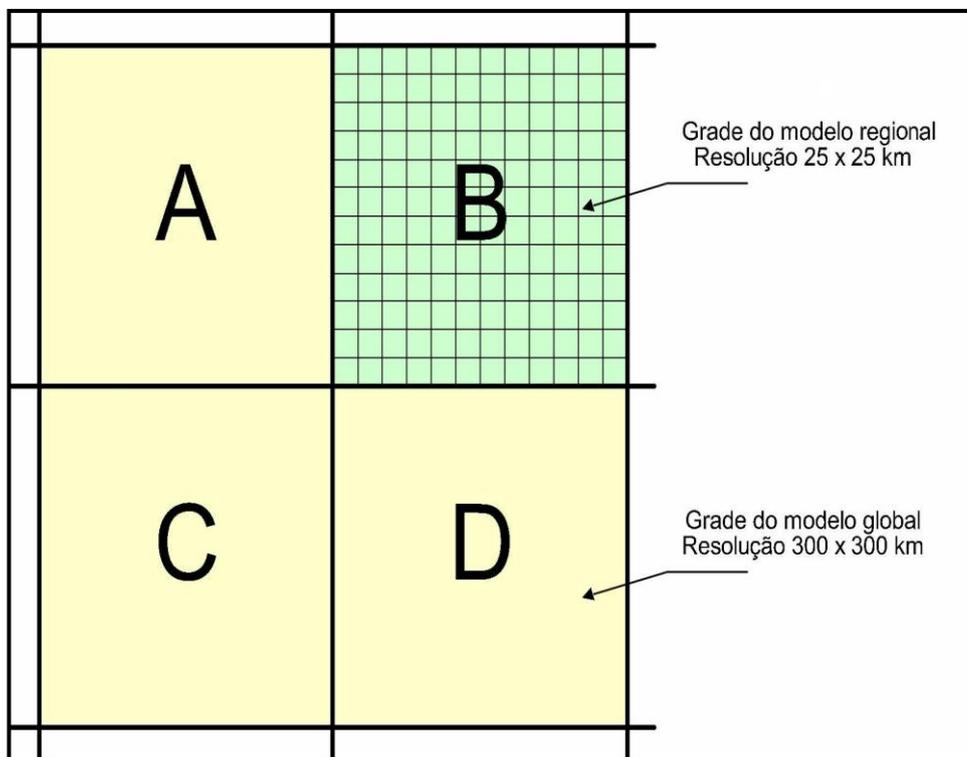
Na Tabela 3.1 são apresentadas as vantagens e desvantagens da utilização do *downscaling* dinâmico ou do estatístico nos estudos de impactos de mudanças climáticas nos recursos hídricos em nível de bacia hidrográfica.

**Tabela 3.1 – Resumo comparativo das vantagens e desvantagens da utilização das técnicas de *downscaling***

<i>Downscaling</i> dinâmico	<i>Downscaling</i> estatístico
<b>Vantagens</b>	<b>Vantagens</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Produz respostas baseadas em processos fisicamente consistentes</li> <li>- Produz informação em resoluções mais finas a partir das saídas de um GCM</li> <li>- Permite resolver processos atmosféricos em escalas menores</li> <li>- Incorpora características regionais – como orografia, vegetação e solos – não contidas nos modelos gerais</li> <li>- Os dados obtidos respondem aos forçantes dos efeitos locais</li> <li>- Fornece <i>valor agregado</i> em estudos das alterações climáticas e seus impactos potenciais; além disso, os sinais de mudanças climáticas regionais podem ser significativamente diferentes daqueles projetados por um GCM devido ao forçamento da orografia e aos efeitos da chuva (LEUNG <i>et al.</i>, 2004)</li> <li>- Pode gerar melhores simulações dos processos de precipitação em nível de bacia hidrográfica e estatísticas climáticas mais altas, gerando cenários de mudanças climáticas realistas para eventos extremos e variabilidade climática (SCHMIDLI <i>et al.</i>, 2006)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Relativamente barato e computacionalmente eficiente</li> <li>- Fornece variáveis climáticas em escala pontual a partir de saídas nas escalas dos GCM</li> <li>- Pode ser usado para obtenção de variáveis que não estão disponíveis nos RCM</li> <li>- Facilmente transferível para outras regiões</li> <li>- Baseado em processos estatísticos padrões e aceitáveis</li> <li>- Pode incorporar observações diretamente no método</li> </ul>
<b>Desvantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Computacionalmente exigente e economicamente custoso</li> <li>- Número limitado de cenários de conjunto</li> <li>- Fortemente dependente das condições de fronteira dos GCM</li> <li>- Variabilidades nas parametrizações internas geram incertezas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Os resultados têm sido pobres em bacias hidrográficas onde o escoamento não está associado ao derretimento da neve (DIAZ-NIETO &amp; WILBY, 2005)</li> <li>- Requer séries históricas de dados extensas e confiáveis para a calibração</li> <li>- Depende da escolha dos preditores</li> <li>- Não há estacionariedade na relação preditor-preditando</li> <li>- A retroalimentação do sistema não está incluída</li> <li>- O tamanho do domínio, a região climática e a sazonalidade afetam a habilidade do <i>downscaling</i></li> </ul>

Fonte: modificada de Fowler *et al.* (2007)

Conforme indicado esquematicamente na Figura 3.6, o modelo regional usa as condições de fronteira na célula do modelo global (resolução de 300 x 300 km) para gerar uma simulação com resolução de 25 x 25 km.



**Figura 3.6** – Detalhamento da resolução dos modelos climáticos por meio da técnica de *downscaling* (Fonte: Silva, 2005)

Kerr (2004) ressaltou que, devido ao aumento na capacidade das técnicas de computação e dos *chips* de processamento, por meio de *clusters* (de custo bem inferior ao dos supercomputadores), a tendência é que cada região do globo possua um modelo atmosférico regional que seja adaptado às suas necessidades e características.

Alguns dos RCM mais utilizados na redução de escala são: o *Mesoscale Model Version 5* (MM5), desenvolvido conjuntamente pela *Pennsylvania State University* e pelo *National Center for Atmospheric Research* (NCAR); o *Weather Research and Forecasting Model*, desenvolvido pelo NCAR; o *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), desenvolvido pela *Air Force Weather Agency* e pela *Federal Aviation Administration*, dos Estados Unidos da América; o modelo ETA, que foi desenvolvido nos anos de 1970 na antiga Iugoslávia e teve seu código-fonte atualizado pelo NCAR, sendo um modelo reconhecido e bastante utilizado no Brasil; e o modelo *Providing Regional Climates for Impact Studies* (PRECIS), desenvolvido no *Hadley Centre for Climate Prediction and Research*, do Reino Unido.

O modelo PRECIS vem sendo intensamente utilizado pelos principais centros mundiais de pesquisas climatológicas do mundo; de acordo com Gondim *et al.* (2008), o modelo é originário de outro modelo regional, o HadRM3, procedente da base do modelo atmosférico global acoplado oceano-atmosfera HadCM3.

Jones *et al.* (2004) destacam que o modelo PRECIS foi criado para facilitar os estudos em escalas regionais e gerar informações de alta resolução para mudanças climáticas nos países considerados em desenvolvimento. Esse modelo está disponível para os centros de pesquisas de excelências desses países, os quais são incumbidos de desenvolverem cenários de mudanças climáticas e analisarem impactos sobre a sua realidade regional.

Alves (2007) avaliou a destreza do modelo PRECIS em simular a variabilidade sazonal dos principais padrões climatológicos sobre a América do Sul e os oceanos adjacentes, por meio de simulações numéricas de longo prazo (1961-1990). Foi possível concluir que esse modelo simula razoavelmente bem não somente o padrão espacial e temporal da precipitação e temperatura, mas também as principais características da circulação atmosférica, revelando inclusive um ganho de detalhes da informação. Foram analisados campos médios sazonais climatológicos da precipitação, temperatura e velocidade do vento do modelo climático regional, comparando-os com os dados observados (*Climatic Research Unit – CRU*, da *University of East Anglia*, do Reino Unido, com resolução horizontal de 0,5° x 0,5°); essa avaliação teve por objeto analisar a capacidade do RCM em reproduzir os principais padrões sazonais do clima da América do Sul. Adicionalmente, foi analisado o ciclo anual da precipitação e temperatura sobre algumas regiões da América do Sul, em análise feita com base nas seguintes estatísticas: viés, coeficiente de correlação ( $R^2$ ) e o erro quadrático médio (RMSE), cujas expressões são apresentadas na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2 – Sumário das estatísticas de avaliação utilizadas**

Medidas de verificação	Expressões
viés	Viés = $S - O$
Coeficiente de correlação	$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}}$
erro quadrático médio	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}$

Fonte: Spiegel (1993) *apud* Alves (2007); Wilks (1995) *apud* Alves (2007)

Na Tabela 3.2, S e O representam os valores simulados e observados, respectivamente, de uma variável meteorológica,  $\bar{S}$  e  $\bar{O}$  são as médias dos valores simulados e observados, respectivamente; e N é o número de eventos.

Gondim *et al.* (2008) utilizaram o modelo PRECIS com o método de redução de escala de bacia hidrográfica e condições de contorno do modelo climático HadRM3P para avaliar os impactos das mudanças climáticas na demanda de água para irrigação de culturas perenes na bacia do Jaguaribe, no estado do Ceará. Na pesquisa foram estimados aumentos na temperatura mensal e, conseqüentemente, elevação acumulada da evapotranspiração de referência (de 2,2% a 3,1%), diminuições na precipitação média (de 30,9% a 37,3%) para o ano de 2040 em relação ao período 1961-1990.

### 3.2.3 Estudos de modelagem climática na América do Sul

Alves (2007), com a finalidade de identificar o estado da arte da modelagem climática e das previsões do clima na América do Sul, realizou uma revisão bibliográfica a partir de 1994. Na sequência são apresentadas as contribuições de Horel *et al.* (1994), Chou *et al.* (2002) e Rojas (2006).

Horel *et al.* (1994) utilizaram uma versão modificada do modelo regional *Mesoscale Meteorological Model 4* do NCAR e realizaram simulações climáticas para investigar os processos que controlam as características da circulação de grande escala sobre a bacia amazônica. Os resultados revelaram erros, devido a problemas na circulação interna do modelo próxima a montanhas (condição de contorno) e na parametrização física do modelo, principalmente no que diz respeito à precipitação excessiva em regiões próximas aos Andes.

No trabalho de Chou *et al.* (2002), usou-se o modelo ETA acoplado ao esquema de superfície *Simplified Simple Biosphere* para obter simulações integradas continuamente para o período de um mês, sendo considerados os meses de agosto e novembro de 1997. Esses meses estão em fases opostas do ciclo da precipitação anual observado na região central da América do Sul. Os resultados mostraram um significativo ganho na simulação da temperatura superficial e o aumento da precipitação sobre o continente nos meses úmidos.

Rojas (2006) utilizou o modelo MM5 com a finalidade de avaliar a influência das altas resoluções horizontais na precipitação sobre uma região com alta variabilidade de altitude (valor médio de 4.500 m) e outra de topografia relativamente plana (altitude média de 3.000 m) na parte chilena da cordilheira dos Andes. Os períodos de simulação correspondem aos

meses de março a setembro dos anos de 1997 e 1998. Os resultados mostraram que o modelo conseguiu capturar razoavelmente bem a diferença de padrão entre os anos estudados, embora as precipitações tenham sido superestimadas (de 40 a 80%).

Estudos mais recentes sobre modelagem climática na América do Sul são descritos na sequência.

Marengo *et al.* (2012) avaliaram as projeções do clima sobre a América do Sul para o século XXI utilizando o modelo regional ETA-CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos), com saídas do modelo HadCM3 considerando o cenário de emissões A1B. O modelo ETA-CPTEC aninhado com essas condições de contorno foi configurado com uma grade de 40 km e rodado para o período 1961-1990, simulando o clima base, e para o período 2011-2100, para simular possíveis mudanças climáticas. Os resultados apresentados tiveram foco sobre o clima austral de verão e inverno dos períodos 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100, para a América do Sul e para três grandes bacias hidrográficas do Brasil. Estimou-se um forte aumento no gradiente da temperatura, de 4°C a 6°C, entre a América do Sul continental e o Atlântico sul; além disso, foram simuladas grandes reduções de precipitação (até 40%) na Amazônia e no Nordeste do Brasil e aumento das chuvas na costa norte de Peru, no Equador e no sudeste da América do Sul, chegando a 30% no norte de Argentina. Todas as alterações climáticas são mais intensas depois de 2040 e a diferença entre a precipitação e a evapotranspiração sugere déficits de água e reduções dos deflúvios na bacia hidrográfica do rio São Francisco e de rios na Amazônia oriental, indicando que essas regiões são susceptíveis a condições mais secas no futuro.

Solman & Pessacg (2012) avaliaram as incertezas que afetam as simulações do clima regional na América do Sul, na escala sazonal, utilizando o modelo MM5 para o período de três meses da primavera. As incertezas foram avaliadas considerando: a variabilidade interna; a definição do domínio do modelo regional; a escolha das parametrizações físicas; e a seleção de parâmetros físicos em um esquema cúmulo especial. Os resultados mostraram que a variabilidade interna, provocada por diferenças nas condições iniciais, representa o menor nível de incerteza para a variável analisada; para a precipitação e para a temperatura o maior aumento é encontrado na América do Sul tropical, enquanto que para a pressão média ao nível do mar, o maior aumento está localizado sobre o sudeste do oceano Atlântico.

Chou *et al.* (2012) estudaram as simulações climáticas sobre a América do Sul utilizando o modelo regional ETA forçado com quatro membros de um conjunto do modelo global

HadCM3. O modelo ETA foi modificado para obtenção de integrações de longo prazo (décadas) e mostrou reproduzir razoavelmente bem o clima presente (período 1961-1990) quando forçado pelo HadCM3; além disso, o modelo ETA foi aninhado com o modelo global HadCM3 e configurado com uma resolução horizontal de 40 km e 38 níveis na vertical; os resultados foram obtidos para o inverno e o verão. Os altos e baixos padrões de circulação produzidos pelo aninhamento ETA-CPTEC/HadCM3 mostraram boa concordância com dados de reanálise, especialmente dados de precipitação média e temperatura com dados observados da CRU; além disso, os anos de *La Niña* e *El Niño* foram identificados nos membros do HadCM3 rodados com base nas previsões climáticas da NOAA, e a precipitação e as anomalias das temperaturas (típicas desses eventos) são reproduzidas pela maioria dos membros ETA-CPTEC-HadCM3, embora ocorram pequenos deslocamentos das posições das anomalias.

Aplicações de modelagem de mudanças climáticas para inferir seus impactos sobre seres vivos foram realizadas por Nori *et al.* (2011), que simularam a distribuição espacial da rã-touro na sua escala nativa, com base em modelos climáticos e cenários de emissão de gases de efeito estufa; além disso, esses autores projetaram os impactos das mudanças climáticas nas áreas protegidas da América do Sul para o período de 2050 a 2080. Os resultados mostraram uma ligeira diminuição da área potencial para a invasão da rã-touro. Foram suportadas novas evidências apoiadas na vulnerabilidade da biodiversidade da Mata Atlântica como *hotspot* de invasão da rã-touro.

Hirota *et al.* (2010) utilizaram um modelo conceitual clima-vegetação-fogo para avaliar a sensibilidade e vulnerabilidade da savana, da floresta e da transição floresta-savana às mudanças ambientais na América do Sul. Segundo os autores, nas atuais condições o modelo utilizado mostrou que, na ausência de incêndios, as florestas tropicais podem se estender 200 km para o domínio da savana; além disso, o modelo identificou mudanças ambientais na temperatura (variações de 2°C a 6°C) e alterações na precipitação (variações de -20% a +10%) em resposta ao aquecimento global e aos desmatamentos.

Assim como observado em várias regiões do mundo, as bacias hidrográficas colombianas estão expostas aos potenciais efeitos de eventuais mudanças climáticas e aos impactos associados. Dessa forma, alguns estudos de modelagem climática já foram realizados na Colômbia.

Mesa *et al.* (1997) e Pabón (2006) identificaram alterações na temperatura média do ar, na precipitação, nos glaciares e nas vazões em diversas bacias hidrográficas colombianas, o que sustentaria evidências de mudanças que podem gerar reduções na disponibilidade dos recursos hídricos para diversos propósitos.

Segundo Pabón (2006), os diversos cenários de mudanças climáticas mostram, para as últimas três décadas do século XXI, um incremento da temperatura do ar de até 4°C e alterações na precipitação para as diferentes regiões da Colômbia (diminuição de até 30% nas regiões andinas e costa caribenha, e incremento na vertente pacífica) em relação aos valores do período 1961-1990.

### **3.3 Modelos hidrológicos**

Nos últimos anos avanços dos modelos matemáticos têm sido observados em todas as áreas do conhecimento humano, científico e dos recursos naturais. O uso desses modelos aumenta a possibilidade de simular ou prever fenômenos físicos de curto, médio e longo prazo; além disso, permitem conhecer as relações causa-efeito sem fazer alterações nos sistemas reais.

Um modelo é uma representação simplificada de um sistema mais complexo, e pode ser descrito como uma simplificação da realidade, sendo uma ferramenta importante para uso na avaliação e conhecimento dos processos ambientais.

A modelagem matemática permite compreender melhor o sistema natural, fazer previsões de situações ou reproduzir o passado, com a finalidade de direcionar as ações de decisão. Na área de recursos hídricos, os modelos matemáticos têm evoluído e vêm sendo aperfeiçoados desde a década de 1950 para prever e avaliar o impacto das atividades humanas na quantidade e qualidade das águas superficiais e subterrâneas.

Segundo Moriasi *et al.* (2012), os modelos hidrológicos e de qualidade da água são cada vez mais utilizados para avaliar os impactos do clima, do uso da terra, dos cultivos e das práticas agrícolas na quantidade e qualidade da água.

Para Beven (1989), os modelos de simulação têm dois objetivos principais: o primeiro é explorar as implicações de fazer certas suposições sobre a natureza do mundo real; e o segundo é prever ou prever o comportamento do mundo real, sobre um conjunto de suposições que ocorreram naturalmente.

Segundo Pechlivanidis *et al.* (2011), os modelos hidrológicos são importantes para uma ampla gama de aplicações, incluindo recursos hídricos, planejamento, desenvolvimento e gestão, previsão de cheias e secas, qualidade de água, hidro-ecologia, clima e modelagem de sistemas acoplados. No entanto, devido às restrições de recursos e ao alcance limitado das técnicas de medição disponíveis, existem limitações para disponibilizar dados espaço-temporal e avaliar os possíveis impactos hidrológicos derivados das mudanças climáticas e câmbios no uso do solo.

Chow *et al.* (1994) definiram os modelos hidrológicos como uma aproximação do sistema real cujas entradas e saídas são variáveis hidrológicas mensuráveis e sua estrutura é um conjunto de equações que conectam as entradas e saídas; além disso, dividem os modelos hidrológicos em determinísticos e estocásticos.

Os modelos determinísticos não consideram a aleatoriedade nos parâmetros e definem o sistema físico como um grupo de eventos governados por um resultado identificável. Em modelos determinísticos uma entrada produz sempre uma mesma saída, ou seja, são obtidos prognósticos.

Os modelos estocásticos têm saídas que são aleatórias e definem o sistema físico como um resultado incerto e aleatório; portanto, com os mesmos são obtidas previsões.

Dependendo do tratamento da variação espacial, os modelos determinísticos podem ser divididos em concentrados e distribuídos; nos modelos concentrados o sistema é considerado como um ponto único sem dimensões no espaço (os parâmetros e as variáveis apresentam variação com o tempo), o que é uma simplificação da realidade. Os modelos distribuídos consideram que os processos hidrológicos ocorrem em vários pontos do espaço e definem as variáveis do modelo como funções das dimensões espaciais, permitindo dividir a bacia hidrográfica em elementos homogêneos, representando as variações espacial e temporal do sistema físico.

Em relação à escala temporal, os modelos podem ser considerados contínuos ou de eventos isolados, sendo que os primeiros referem-se aos modelos chuva-vazão em que se empregam séries temporais contínuas de evapotranspiração e precipitação, em diferentes intervalos de tempo, fornecendo séries contínuas de vazão.

Segundo Tucci (2005), os modelos precipitação-vazão representam a parte do ciclo hidrológico compreendida entre a precipitação e a vazão; além disso, descrevem a distribuição espacial da chuva, a evaporação, a percolação, a infiltração, a água subterrânea, o escoamento superficial e subsuperficial, e as perdas por interceptação.

Nos últimos anos, os modelos hidrológicos têm sido amplamente utilizados por hidrólogos e gestores de recursos hídricos como uma ferramenta para entender e gerenciar as atividades antrópicas que afetam as bacias hidrográficas; tradicionalmente esses modelos são calibrados para otimizar os parâmetros segundo uma dada função objetivo (ZHANG *et al.*, 2009).

Segundo Jain (1993), o processo principal para a aplicação de um modelo hidrológico em uma bacia hidrográfica é a calibração, cujo objetivo é determinar os parâmetros do modelo de forma que exista uma correspondência aceitável entre os dados observados da variável de interesse e os valores simulados pelo modelo. Além disso, o mesmo autor afirma que a calibração poder ser realizada de forma manual ou automática; na calibração manual o processo é de tipo tentativa e erro (é necessário o conhecimento do modelo hidrológico), enquanto na calibração automática é utilizado um algoritmo de otimização. Os parâmetros obtidos em uma calibração automática podem ser melhorados manualmente.

Já a etapa de validação de um modelo hidrológico consiste em medir sua capacidade preditiva mediante a comparação das vazões calculadas e observadas, utilizando os parâmetros determinados na fase de calibração, mas em um período diferente.

Segundo Zhang *et al.* (2011); Wu *et al.* (2012a) e Wang *et al.* (2012), geralmente são utilizadas medidas estatísticas para a avaliação do desempenho de modelos hidrológicos. Três das medidas estatísticas mais empregadas são:

- Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (COE): é uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variância residual em comparação com a variância dos dados observados; o COE varia entre  $-\infty$  e 1, sendo o valor unitário indicativo de um perfeito ajuste; o valor do COE é calculado pela equação a seguir:

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{OBS_i} - Q_{SIM_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{OBS_i} - \bar{Q}_{OBS})^2} \quad (3.1)$$

Em que:

$Q_{OBS}$  = vazão observada;

$Q_{SIM}$  = vazão simulada;

$\bar{Q}_{OBS}$  = média da vazão observada; e

$N$  = número de eventos.

- Desvio do evento analisado (Dv%): essa estatística permite conhecer os desvios dos dados simulados em relação aos dados observados; quanto menor o valor do Dv%, melhor é o ajuste ou eficiência do modelo e o valor nulo representa uma simulação perfeita; o valor do Dv% é calculado pela seguinte equação:

$$Dv\% = \left( \frac{Q_{OBS} - Q_{SIM}}{Q_{OBS}} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

- Coeficiente de correlação ( $R^2$ ): é uma medida estatística que mostra como os valores simulados se correlacionam com os dados observados; seu valor varia entre 0 e 1; o valor unitário representa uma correlação linear entre os valores observados e simulados; o valor nulo indica que não existe correlação entre os valores observados e preditos pelo modelo hidrológico; o valor do  $R^2$  é calculado pela seguinte equação considerando valores de vazões observadas e simuladas (na Tabela 3.2 foi apresentada a equação para uma variável meteorológica qualquer):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{OBS_i} - \bar{Q}_{OBS})(Q_{SIM_i} - \bar{Q}_{SIM})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{OBS_i} - \bar{Q}_{OBS})^2 (Q_{SIM_i} - \bar{Q}_{SIM})^2}} \quad (3.3)$$

Em que:

$\bar{Q}_{SIM}$  = média da vazão simulada.

A utilidade de modelos hidrológicos na modelagem de processos físicos em nível de bacia hidrográfica pode ser comprovada em aplicações ou pesquisas voltadas para: simulação hidrológica, estudos de impactos ambientais, dimensionamento de sistemas de abastecimento, avaliação de níveis de reservatórios, operação e controle de cheias, e

drenagem urbana. Portanto, os modelos hidrológicos são essenciais para a análise e simulação da hidrologia em bacias hidrográficas, atuando como uma ferramenta auxiliar na solução de problemas de planejamento e no processo de tomada de decisão na gestão dos recursos hídricos.

De acordo com Santos (2009), os modelos hidrológicos são ferramentas úteis para simular cenários de processos hidrológicos permitindo auxiliar nas tomadas de decisões e antecipar as possíveis ocorrências. Os modelos hidrológicos têm sido amplamente utilizados na avaliação de possíveis impactos de mudanças climáticas e de uso do solo sobre os aspectos qualitativos e quantitativos nos recursos hídricos em uma bacia hidrográfica.

A seguir, é apresentada uma revisão bibliográfica do modelo o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), de uso corrente na literatura, e que será utilizado nesta pesquisa.

De acordo com Neitsch *et al.* (2011), o modelo SWAT foi desenvolvido pelo pesquisador Jeff Arnold para o *Agricultural Research Service* dos Estados Unidos da América. Grande parte dos avanços contidos em alguns modelos hidrológicos anteriores foi incorporada no desenvolvimento do modelo SWAT; o modelo é dividido em quatro componentes: produção de água, produção de sedimentos, propagação em canais e propagação em reservatórios. Na formulação dos parâmetros hidrológicos é utilizada a metodologia do *Soil Conservation Service* (SCS). Uma parte central do modelo é a equação do balanço geral de água, sendo o escoamento superficial determinado pelo método do Número de Curva do SCS.

O modelo hidrológico está estreitamente ligado a um Sistema de Informação Geográfica (SIG) e trabalha com base em unidades de resposta hidrológica, incluindo abordagens conceituais e físicas. Para Machado (2002), o uso integrado da modelagem hidrológica e de um SIG tem evoluído para o ponto em que as vantagens de cada sistema podem ser totalmente exploradas dentro de uma poderosa ferramenta para análise em bacias hidrográficas. Uma vez que uma das maiores limitações ao uso de modelos hidrológicos é a dificuldade em se trabalhar com uma grande quantidade de dados que descrevem a heterogeneidade dos sistemas naturais, os SIG são empregados na criação do banco de dados para esses modelos, permitindo a aquisição e o tratamento de dados georreferenciados (referenciados espacialmente), e a manipulação de dados de diversas fontes.

Segundo Neitsch *et al.* (2011), o modelo SWAT incorpora vários elementos do modelo hidrológico ARS e é um descendente direto do *Simulator for Water Resources in Rural*

*Basins* (SWRRB); além disso, os seguintes modelos específicos serviram de base para o desenvolvimento do modelo SWAT: *Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems* (CREAMS), *Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems* (GLEAMS) e *Erosion-Productivity Impact Calculator*.

O desenvolvimento do modelo SWRRB se iniciou com a modificação do modelo hidrológico CREAMS; entre as modificações realizadas podem ser mencionadas: a incorporação de um componente de água subterrânea ao modelo; a utilização do modelo para realizar simulações em várias sub-bacias com a finalidade de prever o armazenamento específico; e a introdução de uma ferramenta de simulação do tempo para chuva, radiação solar e temperatura.

Uma primeira versão do modelo SWRRB foi desenvolvida no ano 1989, com a finalidade de avaliar componentes de qualidade de água; na sequência, foram consideradas algumas modificações: foi incorporado o componente de pesticida do modelo GLEAMS; foi incluída a tecnologia do SCS para estimar cheias; foram desenvolvidas novas equações para o cálculo da sedimentação, entre outras. Essas modificações aumentaram a capacidade do modelo para avaliação de uma imensa variedade de problemas em nível de bacia hidrográfica.

O modelo SWAT foi desenvolvido no ano de 1990 com a finalidade de avaliar e prever o impacto das práticas de manejo do solo sobre a produção de água, sedimentos e a qualidade da água em bacias hidrográficas.

O processo de representação do ciclo hidrológico no modelo SWAT é dividido em duas fases: a fase bacia e a fase canal; a fase bacia controla o tempo, o volume de água e a carga de poluente em águas receptoras; a fase canal simula a propagação do sistema fluvial. O volume de água é estimado utilizando o método do Número de Curva; a bacia hidrográfica é dividida em unidades de resposta hidrológica (HRU), que são unidades espaciais homogêneas, caracterizadas por possuírem propriedades, tanto geomorfológicas (solo-uso do solo) quanto hidrológicas, semelhantes (WANG *et al.*, 2012).

O ciclo hidrológico é simulado pelo modelo SWAT baseado na seguinte equação do balanço de água:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw})_i \quad (3.4)$$

Na qual  $SW_i$  é o conteúdo de água no solo no dia  $i+1$  (mm);  $SW_o$  é o conteúdo de água no solo no dia  $i$  (mm);  $t$  é o tempo (dia),  $R_{day}$  a precipitação no dia  $i$  (mm);  $Q_{surf}$  é o escoamento superficial no dia  $i$  (mm);  $E_a$  é a evapotranspiração no dia  $i$  (mm);  $w_{seed}$  é a percolação no dia  $i$  (mm); e  $Q_{gw}$  é fluxo de água subterrânea no dia  $i$  (mm).

O modelo hidrológico tem as seguintes características:

- O modelo SWAT é fisicamente baseado e, além de incorporar equações e regressão para descrever as relações entre variáveis de entrada e saída, o modelo requer informação específica de tempo, propriedades do solo, topografia, vegetação e práticas de manejo do solo que ocorrem na bacia hidrográfica.
- O modelo SWAT é computacionalmente eficiente; bacias hidrográficas muito grandes podem ser simuladas; além disso, pode ser considerada uma variedade de estratégias, com baixos custos e sem empregar tempo excessivo.
- A subdivisão da bacia hidrográfica permite que sejam estimadas as diferenças na evapotranspiração para vários solos e cultivos; o escoamento é simulado separadamente para cada HRU e encaminhado para se obter o escoamento total na bacia hidrográfica, o que permite incrementar a precisão do modelo e gerar maior informação da descrição física do balanço de água na bacia.

Segundo Gosain *et al.* (2011), uma das vantagens do modelo SWAT é que, ao contrário de outros modelos convencionais de simulação hidrológica, o mesmo não requer calibração em bacias hidrográficas não monitoradas; além disso, no modelo SWAT, um Modelo Digital de Elevação (MDE) pode ser utilizado para fornecer os dados de entrada associados à cobertura vegetal, e ao tipo e ao uso do solo.

De acordo com Gassman *et al.* (2007), o modelo SWAT vem sendo aceito internacionalmente como uma ferramenta robusta para a modelagem interdisciplinar em escalas diária e mensal de bacias hidrográficas de diferentes características, fato ratificado nas conferências internacionais sobre o modelo, nas centenas de documentos técnicos relacionados ao mesmo apresentados em eventos científicos e por artigos publicados em revistas e jornais em diferentes partes do mundo referentes às suas aplicações.

Segundo os resultados obtidos por Romanowicz *et al.* (2005), o modelo SWAT é altamente sensível à qualidade dos dados de entrada relacionados ao uso do solo, ao uso da terra e aos solos.

Uma descrição completa do modelo SWAT pode ser encontrada em Arnold *et al.* (1998) e Neitsch *et al.* (2011). Os resultados obtidos em algumas aplicações do modelo SWAT são apresentados a seguir, em ordem cronológica.

Van Liew & Garbrecht (2003) avaliaram a capacidade do modelo SWAT para simular vazões sob diferentes condições climáticas na bacia hidrográfica experimental do rio Washita, no sudoeste do estado de Oklahoma, nos Estados Unidos da América. Em nível mensal os resultados indicaram que, uma vez calibrado para condições úmidas, o modelo teve bom desempenho na etapa de calibração de períodos úmido, médio e seco, com valores do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe de, respectivamente, 0,65, 0,86 e 0,45. Já para simulações com valores diários de precipitação, o desempenho foi inferior, tendo sido obtidos valores do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe de 0,55, 0,59 e -0,06, também respectivamente para períodos úmido, médio e seco. Segundo os autores, o baixo desempenho refletido pelo último valor pode ser explicado pela superestimativa de dois valores associados a um evento de grande magnitude, pois, caso os mesmos sejam desconsiderados, o valor do referido coeficiente passa de -0,06 para 0,51.

Chaplot (2005) utilizou o modelo SWAT para avaliar como os parâmetros espaciais de entrada do mesmo descrevem as características da bacia. Foram utilizados mapas de solos nas escalas 1:25.000; 1:250.000 e 1:500.000 com o objetivo de avaliar o impacto da precisão das informações do solo na estimação do fluxo de água; além disso, o autor combinou tamanhos de grade dos modelos de elevação digital de 20 a 50 m. A escala do mapa de solos foi de muita importância para as previsões do modelo SWAT, visto que as estimativas de escoamento superficial com informação de solo em escala 1:25.000 foram mais precisas do que aquelas obtidas com outras escalas.

Mishra *et al.* (2007) utilizaram o modelo SWAT com o objetivo de avaliar o efeito do uso do solo, da cobertura do solo e da morfologia nas vazões e na produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica em uma região subtropical da Índia. O coeficiente de correlação entre a chuva e a vazão foi de 0,86, entre a vazão e a produção de sedimentos foi de 0,56, e entre a chuva e a produção de sedimentos foi de 0,55. Os valores de vazão e produção de

sedimentos observados e simulados foram utilizados na priorização de ações de controle de transporte de sedimentos.

Durães (2010) utilizou o modelo SWAT para simular o padrão hidrológico da bacia hidrográfica do rio Paraopeba, Minas Gerais, considerando diferentes cenários de uso e ocupação do solo, com a finalidade de apoiar as ações de gestão da bacia hidrográfica; o modelo foi calibrado e validado em nível mensal; o valor do coeficiente Nash-Sutcliffe obtido na fase de calibração foi de 0,79, o que indicou um bom ajuste.

Barrios & Urribarri (2010) empregaram o modelo SWAT na bacia hidrográfica do rio Chama, na Venezuela, com a finalidade de avaliar seu desempenho na simulação de vazões. Foi realizada uma calibração manual em nível mensal, tendo sido obtidos valores de 0,76 e 0,88 para, respectivamente, o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe e o coeficiente de correlação; concluiu-se que o modelo SWAT realizou uma boa simulação das vazões.

Lelis (2011) utilizou o modelo SWAT para avaliar o escoamento superficial e a perda de solo na bacia hidrográfica do ribeirão São Bartolomeu, localizada no município de Viçosa, Minas Gerais. Na etapa de calibração mensal, foram comparadas as vazões simuladas e observadas e foi obtido um coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe de 0,999.

Tibebe & Bewket (2011) utilizaram o modelo SWAT para avaliar o escoamento superficial e as taxas de erosão na bacia hidrográfica do rio Keleta, na Etiópia; o modelo hidrológico foi calibrado (manualmente) e validado em base mensal com bom nível de exatidão. Na fase de calibração foram obtidos valores de 0,79 para o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe e de 0,83 para o coeficiente de correlação, indicando que o modelo foi capaz de gerar valores simulados de vazões mensais muito próximos aos valores observados.

### **3.4 Integração de modelos atmosféricos e hidrológicos para avaliação de possíveis efeitos de mudanças climáticas**

Segundo Chang *et al.* (2004), o acoplamento de um sistema de modelagem atmosfera-vazão, onde os modelos hidrológicos são acoplados a modelos atmosféricos, é uma ferramenta importante na previsão da precipitação e vazões, e na avaliação dos impactos das mudanças climáticas e da variabilidade climática sobre os recursos hídricos em nível regional.

O ciclo hidrológico tem duas fases, a terrestre e a atmosférica, que geralmente são representadas e/ou simuladas por meio de modelos independentes (os modelos hidrológicos

realizam a quantificação do escoamento e o que ocorre na atmosfera é representado por modelos atmosféricos). Atualmente, a concatenação, acoplamento ou encadeamento de modelos atmosféricos e hidrológicos tem permitido a simulação integral do ciclo hidrológico (fases terrestre e atmosférica); além disso, a disponibilidade de água depende da variabilidade do clima e das condições físicas da superfície da Terra.

Segundo Braga *et al.* (2005), o acoplamento entre modelos atmosféricos e hidrológicos pode ser feito de duas formas: unidirecional e bidirecional. No acoplamento unidirecional as variáveis meteorológicas (precipitação, evapotranspiração, temperatura, dentre outras) previstas pelos modelos climáticos (globais ou regionais) são utilizadas como dados de entrada nos modelos hidrológicos, como ocorre nas pesquisas de avaliação dos impactos das mudanças climáticas, onde as saídas de um modelo climático são utilizadas como dados de entrada dos modelos hidrológicos; operacionalmente esse acoplamento apresenta uma maior flexibilidade devido à autonomia que existe entre os modelos atmosféricos e hidrológicos, face às possibilidades de inserção ou utilização de diferentes tipos de modelos em cada categoria. Para o acoplamento bidirecional entre os modelos climáticos e hidrológicos existe uma troca de informações, fazendo-se necessários ajustes de escala (*downscaling* dos dados meteorológicos e *upscaling* dos dados hidrológicos). Nesse tipo de acoplamento os processos hidrológicos também são representados no modelo atmosférico, que passa a ser um modelo integrado (hidrometeorológico). Normalmente a troca de informação é realizada por meio de interfaces que utilizam esquemas de transferência solo-vegetação-atmosfera.

De acordo com Mölders & Rühaak (2002), o acoplamento bidirecional apresenta desvantagens operacionais, como os altos custos computacionais e a necessidade de transformar as unidades e as coordenadas, que limitam a sequência de troca de informação.

Segundo Silva (2005), a finalidade de representar melhor os processos terrestres dentro dos modelos atmosféricos motivou o desenvolvimento de modelos hidrológicos de grande escala; o acoplamento de modelos hidrológicos e climáticos é classificado em modelos *off-line* e *on-line*. Nos modelos acoplados *off-line*, o modelo climático fornece os valores das variáveis (precipitação, temperatura, velocidade do vento, dentre outras) a serem utilizadas como dados de entrada no modelo hidrológico. Nesse caso, não existe nenhuma interação entre os modelos hidrológico e atmosférico; no acoplamento *on-line* existe uma interação simultânea dos processos atmosfera-superfície e vice-versa.

Para Zeng *et al.* (2003), a maioria dos estudos de simulação hidroclimatológica que consideram a variabilidade espacial da hidrologia utiliza modelos hidrológicos geralmente limitados a estudos de acoplamento em uma via (*off-line*); na maioria das pesquisas realizadas na China, os modelos hidrológicos são empregados para realizar previsões e utilizam características meteorológicas de observações ou de saídas de modelos atmosféricos, as quais são utilizadas como dados de entrada dos modelos hidrológicos; os modelos hidrológicos são acoplados de modo *off-line* (unidirecional) e não podem ser usados diretamente em modelos climáticos, pois só os modelos acoplados bidirecionalmente (*on-line*) podem simular as complexas interações não lineares.

A integração de modelos atmosféricos e hidrológicos tem sido utilizada em vários estudos de avaliação de potenciais mudanças climáticas nos componentes de recursos hídricos de bacias hidrográficas. Na sequência são apresentados, em ordem cronológica, alguns desses estudos.

Yu *et al.* (1999) avaliaram a capacidade da integração *off-line* de um modelo hidrológico distribuído e um modelo climático regional para simular a resposta hidrológica de três eventos de cheias sobre a bacia hidrográfica do rio Susquehanna, localizada no estado da Pensilvânia (Estados Unidos da América). Os dados de precipitação dos eventos de cheias foram obtidos de observações e de saídas do modelo MM5 e os dados observados e valores simulados pelo modelo MM5 foram utilizados como dados de entrada do modelo hidrológico. As vazões obtidas com os valores de precipitação do modelo MM5 são menores do que aquelas simuladas utilizando dados de precipitação observados.

Ritschard *et al.* (1999) avaliaram os impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos em algumas bacias hidrográficas do sudeste dos Estados Unidos da América utilizando o modelo SWAT e um *downscaling* das projeções climáticas do HadCM2; os resultados mostraram que, para o período de 2020 a 2039, a disponibilidade hídrica poderá decrescer em até 10% nas partes mais ao sul da área de estudo durante os períodos em que as necessidades hídricas para a agricultura são essenciais.

Stone *et al.* (2001) estudaram o impacto de mudanças climáticas na bacia hidrográfica do rio Missouri utilizando as saídas do modelo GCM CISRO como condições de contorno do modelo climático regional RegCM acoplado *off-line* com o modelo SWAT. Foram estimados decréscimos entre 10% e 20% da disponibilidade hídrica nos meses de primavera e verão, mas acréscimos nos meses de outono e inverno.

Anderson *et al.* (2002), com a finalidade de avaliar as vazões do rio Calaveras, nas montanhas da Serra Nevada, no estado da Califórnia (Estados Unidos da América), analisaram o desempenho de dois modelos de circulação regional – ETA e MM5 –, com resoluções, respectivamente, de 40 x 40 km e 4 x 4 km, acoplados *off-line* com o modelo hidrológico HEC-HMS. O modelo MM5 foi utilizado para transferir as previsões climáticas do modelo ETA nas resoluções espacial e temporal apropriadas e requeridas pelo modelo hidrológico HEC-HMS para a previsão de vazões. As previsões do modelo ETA podem ser refinadas usando o modelo MM5 para gerar valores de precipitação em escala horária; além disso, a metodologia proposta pode gerar previsões de vazão a cada minuto a partir dos dados gerados pelo modelo MM5.

Jasper *et al.* (2002) combinaram modelos climáticos de alta resolução e modelos hidrológicos acoplados *off-line* com a finalidade de gerar hidrogramas para sete eventos de cheias que ocorreram entre 1993 e 2000 na bacia alpina do lago Maggiore, considerando as bacias hidrográficas dos rios Ticino, Verzasca e Maggia, na Itália. Foram utilizados dados meteorológicos de estações terrestres e radares meteorológicos que forneceram informações de chuva na discretização de 1 km; além disso, foram utilizados dados de cinco modelos numéricos de previsão climática de alta resolução com informação discretizada em malhas entre 2 e 14 km; o modelo hidrológico WaSiM-ETH foi discretizado em células de 500 m, uniformemente distribuídas em todas as bacias. Os modelos meteorológicos utilizados foram: o *Swiss Model* (desenvolvido na Suíça), o *Meso-Scale Non-Hydrostatic Model* (desenvolvido na França), o *Bologna Limited Area Model Version 3* (desenvolvido na Itália) e o *Mesoscale Compressible Community Model* (desenvolvido no Canadá). Segundo os autores, os resultados mostraram que uma alta resolução não necessariamente produz bons resultados na previsão da precipitação, especialmente na alta montanha.

Jha *et al.* (2004) avaliaram o impacto de mudanças climáticas na bacia hidrográfica do rio Mississippi, nos Estados Unidos da América, utilizando um modelo de circulação regional acoplado com o modelo SWAT. Um RCM (RegCM2) foi utilizado para resolver alguns dos processos dinâmicos à escala fina, os quais são contribuintes importantes da precipitação na região de estudo que não são bem representados pelos modelos de circulação global. O modelo SWAT foi calibrado e validado com dados de vazões médias, utilizando dados climáticos observados. O desempenho do uso conjunto do modelo SWAT com um RCM foi examinado empregando-se dados climáticos observados como condições de contorno do

RCM. Os resultados mostraram que a combinação SWAT-RCM teve um bom desempenho, especialmente para as simulações de base anual.

Christensen *et al.* (2004) pesquisaram os potenciais efeitos das mudanças climáticas sobre a hidrologia e os recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Colorado (Estados Unidos da América) com base na comparação dos cenários hidrológicos simulados e derivados de um *downscaling* do modelo *Research Parallel Climate Model*; o modelo climático foi acoplado *off-line* com o modelo hidrológico *Variable Infiltration Capacity* para simular os períodos 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2098. Os possíveis impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos foram avaliados por meio da identificação de alterações nos valores anuais de precipitação (diminuições entre 3% a 6%) e temperatura (aumentos entre 1,0 °C a 2,4 °C), com consequentes reduções, de 14% a 18%, nas vazões médias anuais na bacia hidrográfica.

Silva (2005), com a finalidade de realizar previsões de vazões de curto prazo (14 dias) e longo prazo (6 meses), realizou a integração *off-line* do modelo de circulação geral atmosférico do CPTEC e do modelo regional ETA com o modelo hidrológico MGB-IPH, em aplicação com dados da bacia hidrográfica do rio São Francisco (área de drenagem de 639.000 km<sup>2</sup>); as previsões de precipitação dos modelos atmosférico e do ETA foram utilizadas como dados de entrada do modelo MGB-IPH. As previsões de vazão foram avaliadas como muito boas e concluiu-se que o modelo hidrológico é capaz de estimar eventos de difícil previsão com o uso de modelos estocásticos.

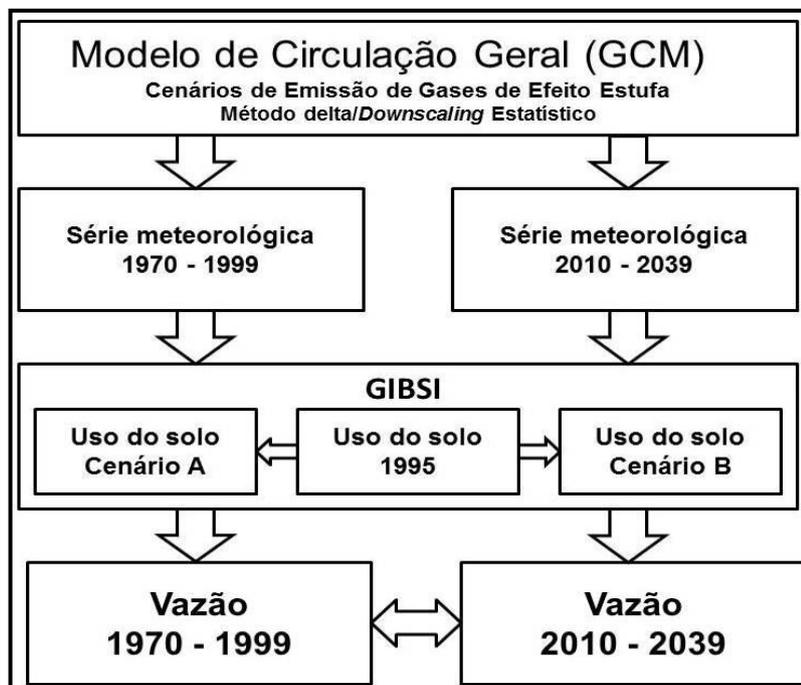
Kilsby *et al.* (2007) avaliaram os impactos de mudanças climáticas nas bacias hidrográficas dos rios Tejo (Espanha) e Guadiana (Portugal) por meio do encadeamento *off-line* do modelo climático regional HadRM3H e o modelo hidrológico UP2. Valores de variáveis climáticas de cenários de emissão de gases de efeito estufa para o período 2070-2100, com prévia correção de erros sistemáticos, foram gerados e utilizados como dados de entrada do modelo hidrológico. Os impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos das bacias hidrográficas foram avaliados verificando câmbios futuros na evapotranspiração potencial e nas vazões dessas bacias hidrográficas, tendo sido considerados graves, pois seria colocado em risco o fornecimento de água a regiões urbanas e rurais de Portugal.

Tomasella *et al.* (2008) avaliaram o efeito de mudanças climáticas sobre as disponibilidades hídricas das bacias hidrográficas dos rios Araguaia e Tocantins utilizando o modelo MGB-IPH. Foram usadas as previsões de clima futuro obtidas do modelo HadCM3 por meio de um *downscaling* realizado com o modelo ETA. Os resultados mostraram uma redução de

20% na vazão média do rio Tocantins, em Tucuruí, no período de 2080 a 2099 se comparada à vazão equivalente do período de 1970 a 1999. O impacto ocorreria de forma mais intensa nos períodos de estiagem. A vazão com 90% de probabilidade de excedência nesse mesmo local diminuiria em 58%.

Quilbé *et al.* (2008) avaliaram a evolução histórica do uso do solo e as mudanças climáticas na bacia hidrográfica do rio Chaudière, no Canadá, utilizando três modelos de circulação geral (CGCM3, HadCM3, ECHAM4) acoplados *off-line* com o modelo hidrológico semidistribuído HYDROTEL. Foram avaliados os efeitos de mudanças climáticas e de dois cenários opostos da evolução do uso do solo para o horizonte 2025. As simulações levaram a uma vasta gama de resultados, dependendo dos modelos climatológicos e dos cenários de emissão de gases considerados.

O enfoque metodológico de Quilbé *et al.* (2008), apresentado na Figura 3.7, embora represente um avanço na integração *off-line* entre os citados GCM de baixa resolução (100-300 km) e um modelo hidrológico semidistribuído, não permitiu estimar o efeito dos cenários do uso do solo proposto na mitigação de mudanças climáticas na bacia hidrográfica do rio Chaudière devido às incertezas próprias dos modelos globais para prever mudanças climáticas em níveis regional ou local.



**Figura 3.7** – Metodologia usada para avaliar os efeitos das mudanças climáticas e cenários de evolução do uso do solo na bacia hidrográfica do rio Chaudière, Canadá (Fonte: Adaptada de Quilbé *et al.*, 2008)

Gosain *et al.* (2011), com a finalidade de avaliar o possível impacto das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos da Índia, por meio do encadeamento *off-line* entre o modelo PRECIS e o modelo SWAT, realizaram simulações para o período de referência (1961-1990) e para os períodos 2012-2050 e 2071-2098, considerando o cenário de emissão de gases de efeito estufa A1B. O modelo PRECIS foi utilizado para gerar valores diários de variáveis meteorológicas, com a finalidade de se determinar a disponibilidade espaço-temporal de água nos rios da Índia. O modelo SWAT foi utilizado para identificar secas, inundações e pontos críticos e vulneráveis às alterações climáticas. Na avaliação dos impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos foram analisadas as possíveis alterações sobre as vazões, a evapotranspiração real e a produção de sedimentos supondo-se que o uso do solo não será alterado em longo prazo. Foram estimadas alterações positivas e negativas dos valores das variáveis hidrológicas, sem indicação de um padrão de variação.

Zhang *et al.* (2011) avaliaram as incertezas da resposta hidrológica às mudanças climáticas na bacia hidrográfica do rio Assiniboia, no Canadá, por meio da integração de dois modelos de circulação regional e o modelo SWAT. O modelo hidrológico foi calibrado e validado com base mensal; na etapa de calibração o modelo mostrou bom desempenho no inverno e subestimações na estação seca, com um coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,73 e um coeficiente de correlação de 0,76; na fase de validação os valores foram de 0,60 e 0,72 para o coeficiente de Nash-Sutcliffe e o coeficiente de correlação, respectivamente. Foram comparados valores médios anuais da produção de água, da precipitação, da temperatura e da evapotranspiração real para um período de referência (1971-2000) e um período futuro (2041-2070), com ênfase na identificação nos possíveis impactos das mudanças climáticas e nas incertezas da utilização do encadeamento dos modelos climáticos e hidrológicos. Estima-se um aquecimento generalizado da bacia hidrográfica; quanto às precipitações, são previstos aumentos no inverno e reduções no verão.

Com a finalidade de avaliar os efeitos das mudanças climáticas sobre as vazões na zona árida da bacia hidrográfica do rio Shiyang (China), Wang *et al.* (2012) utilizaram as saídas de precipitação, temperatura e evapotranspiração potencial do modelo PRECIS acoplado *off-line* com o modelo SWAT para simular o comportamento dessa bacia nos períodos 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100, considerando os cenários de emissão de gases de efeito estufa A2 e B2. O modelo hidrológico foi calibrado e validado em nível mensal, tendo sido obtidos valores de 0,65 para o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe e de 0,70 para o coeficiente de correlação, na fase de calibração; para a fase de validação, esses valores

foram de 0,80 e 0,84, respectivamente. As saídas do modelo hidrológico para os períodos e cenários avaliados foram comparadas com as obtidas para o período de referência 1961-1990. A curva de permanência (para vazões médias, mínimas e máximas) foi utilizada para avaliar os impactos das mudanças climáticas nas vazões da bacia hidrográfica. Os resultados da pesquisa indicaram incrementos entre 0,7 e 6,1% das vazões médias mensais na bacia hidrográfica do rio Shiyang.

Huang *et al.* (2012), com a finalidade de avaliar a resposta hidrológica da bacia hidrográfica do rio Feather, no estado da Califórnia (Estados Unidos da América), ao aquecimento global, realizaram o acoplamento *off-line* do modelo hidrológico *Precipitation-Runoff Modeling System* com seis modelos climáticos globais e os cenários de emissão de gases de efeito estufa A2 e B2. Os resultados das projeções mostraram um aumento generalizado da temperatura média anual (valores entre 0,6 °C e 2,3 °C) e variações da temperatura média anual entre -11,3% e 9,8% para o período 2030-2059. Os efeitos nos valores de vazão são relativamente menores, pois são estimados aumentos entre 2% e 5% de abril a julho apenas para dois dos cenários considerados; por fim, conclui-se que as vazões máximas diárias não diminuem quando as condições climáticas se tornam mais secas face ao derretimento da neve.

Wu *et al.* (2012b), com a finalidade de avaliar o efeito das mudanças climáticas e o incremento de CO<sub>2</sub> na hidrologia da bacia hidrográfica do rio Mississipi, utilizaram as saídas de quatro modelos de circulação global como projeções do clima futuro para cenários de emissão de gases de efeito estufa A2 e B1. Essas saídas foram utilizadas como dados de entrada do modelo SWAT. Para avaliar os possíveis efeitos das mudanças climáticas e do incremento do CO<sub>2</sub>, o período de referência foi de 1961-1990 e o futuro de 2071-2100; foram feitas comparações para avaliar mudanças da produção de água, da evapotranspiração real e da umidade no solo. As simulações indicam que o acúmulo de 10 partes por milhão de CO<sub>2</sub> a cada cinco anos pode representar um aumento de 0,15 mm nas vazões da bacia.

### **3.5 Desafios da integração de modelos atmosféricos e hidrológicos**

Para a análise das debilidades e dos desafios que se apresentam na integração dos modelos atmosféricos e hidrológicos é importante ressaltar que os modelos de circulação geral têm sido desenvolvidos para simular o clima atual. Além disso, são utilizados para prever as mudanças climáticas futuras e apresentam uma grande habilidade para representar escalas espaciais e hemisféricas.

Considerando os impactos das mudanças climáticas globais nos recursos hídricos, os enfoques da integração dos modelos atmosféricos e hidrológicos têm como objetivo principal conhecer os impactos dos processos atmosféricos na hidrologia local e formular estratégias para mitigação das consequências na escala das comunidades.

Por outro lado, para analisar a metodologia de integração dos modelos climáticos e hidrológicos em relação às necessidades de avaliação dos impactos na hidrologia em escala regional, devem-se analisar as seguintes limitações:

- A precisão dos modelos de circulação geral decresce com o aumento das resoluções espacial e temporal para escalas mais finas, mas as necessidades de informação de estudos de impacto aumentam com resoluções maiores.
- Segundo Fowler *et al.* (2007), os modelos de circulação geral não foram projetados para avaliar impactos de mudanças climáticas na hidrologia; destaca-se que a previsão do escoamento por meio de um GCM é considerada simplista e carece de uma transferência lateral de água na fase terrestre (XU, 1999). O acoplamento *off-line* dos modelos hidrológicos utilizando saídas diretas dos modelos de circulação geral tem mostrado um desempenho muito pobre; por isso, é recomendável excluir a utilização direta desses dados em estudos de avaliação da mudança climática na hidrologia (PRUDHOMME *et al.*, 2002).
- A acurácia dos modelos de circulação geral decresce para os processos de geração de variáveis superficiais; o desempenho desses modelos melhora na obtenção de variáveis da troposfera livre.
- A acurácia dos modelos de circulação geral decresce na geração de variáveis como a precipitação, evapotranspiração, escoamento e umidade do solo, sendo maior na geração de variáveis climáticas (temperatura, pressão do ar, umidade do ar).
- Os modelos climáticos são normalmente desenvolvidos em condições estacionárias e são utilizados em condições dinâmicas (padrões ou variáveis que mudam na escala regional) sem provar a capacidade preditiva desses modelos. Assim, como os modelos climáticos reproduzem as observações, é provável que não tenham a capacidade de prever o clima futuro. Hoje, algumas pesquisas tentam definir se

diferentes parametrizações dos modelos climáticos produzem simulações de fluxo similares.

Ainda que a integração de modelos climáticos e hidrológicos apresente desvantagens, essas estão relacionadas aos vazios que ocorrem na integração dos modelos. A seguir são apresentados os vazios e os enfoques metodológicos propostos para sua redução ou minimização:

1. Diferenças entre as escalas espacial e temporal dos modelos climáticos e os requerimentos dos modelos hidrológicos: o tamanho do sistema climático (atmosfera, oceano, superfície) e o intervalo de tempo dos fenômenos do clima (de anos ou décadas) é um fator limitante no desenvolvimento de modelos climáticos. Além disso, os modelos hidrológicos com frequência são rodados considerando escalas pequenas ou para bacias hidrográficas (em áreas montanhosas) onde ocorrem processos de escalas espaciais mais finas que os resolvidos nos modelos climáticos. Para reduzir esse vazio é recomendável realizar processos de *downscaling*, para gerar dados meteorológicos e climáticos de alta resolução, os quais serão os dados de entrada dos modelos hidrológicos.

Wilby *et al.* (2002) avaliaram a exatidão dos métodos de redução de escala dinâmico e estatístico, concluindo que as técnicas de *downscaling* são usadas para solucionar vazios de informação espacial e temporal que têm os modeladores e avaliadores dos impactos das mudanças climáticas. Uma das vantagens dos RCM é que eles podem resolver características atmosféricas em escalas menores, como a precipitação orográfica. O *downscaling* estatístico facilita o desenvolvimento múltiplo de cenários meteorológicos diários a baixo custo.

Leung *et al.* (2004) pesquisaram como o *downscaling* dinâmico fornece valores agregados em estudos de alterações climáticas e seus impactos potenciais; além disso, os sinais de mudanças climáticas regionais na temperatura e precipitação podem ser significativamente diferentes entre os valores gerados pelos GCM e RCM devido aos efeitos da orografia e dos processos convectivos locais sobre as chuvas em bacias hidrográficas montanhosas.

O uso de modelos regionais gera incertezas adicionais àquelas associadas aos modelos de circulação geral; as maiores incertezas dos RCM estão relacionadas à mudança do domínio espacial, da região e da sazonalidade. Ainda que sejam pequenas, as incertezas não são claras na avaliação dos impactos das projeções futuras relacionadas ao clima. As maiores

incertezas são derivadas da estrutura e da física da formulação dos modelos de circulação geral; além disso, as incertezas podem ser derivadas da combinação RCM/GCM que tem a mesma física ou uma resolução variável no caso dos GCM (ROWELL, 2006).

2. Diferenças na coluna atmosférica vertical entre os modelos climáticos e os requerimentos dos modelos hidrológicos: os modelos climáticos têm maiores habilidades para simular o clima da troposfera livre, uma vez que a mesma é mais homogênea do que a superfície terrestre em termos espaciais e temporais. As estatísticas das variáveis climáticas na superfície terrestre produzidas pelos modelos climáticos não têm boa representação; é importante ressaltar que os modelos hidrológicos usam as variáveis climáticas da superfície terrestre como dados de entrada.

3. Diferenças da precisão para os fluxos e estados simulados pelos modelos climáticos: os modelos climáticos foram concebidos para simular adequadamente variáveis como a temperatura, a velocidade do vento e a pressão do ar; no entanto, a capacidade decresce para a simulação de variáveis como a precipitação.

Os tipos de erros mais comuns na precipitação prevista se referem às distribuições espacial e temporal dos eventos e a intensidade da precipitação. Mas, de maneira geral, esses erros podem ser corrigidos ou minimizados por meio do uso de técnicas estatísticas (SILVA, 2005).

Segundo Marengo *et al.* (2003), os modelos climáticos são ajustados para simular a circulação da atmosfera em todo o planeta. Por isso, em algumas regiões os modelos climáticos têm a capacidade de simular as condições de chuva; em outras regiões, como no sul do Brasil, na Índia e na América do Norte, o período chuvoso é considerado imprevisível nesses modelos, embora alguns modelos possam simular anomalias de precipitação associadas à temperatura superficial do mar; para muitas regiões os resultados dos modelos gerais apresentam desvios sistemáticos em relação aos valores observados. A correção dos erros é realizada por meio da avaliação das variáveis previstas pelo modelo global como variação percentual relativa à climatologia do modelo; depois são extraídas as variações associadas aos valores das variáveis da climatologia observada.

Segundo Fowler *et al.* (2007), as aplicações de *downscaling* dinâmico na literatura têm mostrado consistentemente que as saídas dos RCM não podem ser utilizadas em estudos de mudanças climáticas sem a correção prévia de erros sistemáticos.

Segundo Tucci & Braga (2003), antes de serem usadas como entrada no modelo hidrológico, as previsões de precipitação, seja de um modelo global ou regional, passam por um processo de correção de erros sistemáticos. Uma vez efetuadas as correções na precipitação prevista, as mesmas são inseridas como dado de entrada do modelo hidrológico, em valores totais diários, para posterior geração de previsões também diárias de vazões; além disso, resultados de uma aplicação na bacia do rio Uruguai mostraram que as precipitações previstas pelo modelo climático possuíam um erro sistemático em relação aos dados observados. Para corrigir esse erro, desenvolveu-se uma metodologia baseada na transformação da distribuição de probabilidades de precipitação diária.

A correção de erros sistemáticos normalmente empregada está baseada em uma transformação da curva de distribuição de probabilidades de precipitação, conforme apresentado nos trabalhos de Hay *et al.* (2002), Wood *et al.* (2002), Hay & Clark (2003) e Tucci *et al.* (2003). Nesse método, para cada mês do ano e para cada ponto da grade de previsão do modelo climático são desenvolvidas duas curvas de distribuição de probabilidade: a dos dados observados e a dos valores previstos de chuva diária.

Silva (2005) afirma que uma das vantagens do método é permitir a manutenção da variabilidade interanual, que foi razoavelmente bem captada em sua já citada aplicação na bacia do rio São Francisco. Tomasella *et al.* (2008), na também já citada modelagem nas bacias dos rios Araguaia e Tocantins, corrigiram erros sistemáticos da precipitação utilizando a transformação da curva de distribuição de probabilidades, concluindo que o método mostrou-se foi eficiente.

Há outros métodos de correção de erros sistemáticos – por exemplo: *linear scaling*, *local intensity scaling*, *power transformation* e *variance scaling*. Ressalta-se que Teutschbein & Seibert (2012) consideram que o método de transformação da curva de distribuição de probabilidades, quando comparados com os citados, gera melhores resultados em modelações hidrológicas.

Para reduzir as debilidades dos modelos climáticos na representação dos processos do ciclo hidrológico é recomendável simular esses processos na escala da bacia. A escolha de um modelo para um estudo de caso particular depende de muitos fatores, sendo dominantes o propósito do estudo e a disponibilidade de dados. Os modelos mais complexos em termos de estrutura e requerimentos de entrada podem gerar resultados adequados para um amplo espectro de aplicações. Os modelos mais simples podem ter um conjunto de aplicações mais

reduzido e podem gerar resultados adequados a um menor custo, sempre que a função objetivo é adequada.

Segundo Gleick (1986), as estimativas de mudanças na disponibilidade de água em nível regional devem ser calculadas por meio de avaliações hidrológicas regionais que incorporem a complexidade da topografia, as características do solo, os armazenamentos natural e artificial, e a variabilidade estacional. O uso de modelos hidrológicos em nível de bacia hidrográfica para avaliar os efeitos de mudanças climáticas na hidrologia local, além de reduzir as incertezas derivadas dos *downscaling*, tem as seguintes características favoráveis:

- Os modelos hidrológicos foram testados para diferentes condições climáticas e fisiográficas; além disso, foram estruturados para ser usados em diversas escalas espaciais, desde que a representação do processo dominante esteja disponível para seu uso; e
- Os modelos hidrológicos podem ser adaptados às características dos dados disponíveis de forma que as perturbações climáticas derivadas dos modelos de circulação geral e regional (em diferentes níveis de *downscaling*) podem ser usadas como dados de entrada do modelo hidrológico; dessa forma, podem ser estudados os impactos dos vários cenários de mudanças climáticas sobre a bacia.

A avaliação dos efeitos de mudanças climáticas em nível de bacia hidrográfica tem levado pesquisadores a tentar prever as relações meteorológicas e hidrológicas a partir da utilização de encadeamentos de modelos de previsão climática e hidrológicos. Os principais desafios relacionados à integração desses tipos de modelos em nível de bacia hidrográfica são apresentados a seguir:

- Gerar melhoras contínuas nos métodos para avaliar os efeitos de mudanças climáticas em nível de bacia hidrográfica, especialmente no caso de áreas andinas, de alta variabilidade física, climática e latitude quase zero.
- Desenvolver métodos para avaliar as incertezas dos cenários de previsão climática, nos procedimentos de *downscaling* e modelagem hidrológica. A avaliação das incertezas pode fornecer uma estimativa dos limites de confiança nos resultados dos modelos.

- Avaliar se o enfoque *off-line* fornece melhores estimativas nos cenários de impactos das mudanças climáticas em nível de bacia hidrográfica; além disso, avaliar se as escalas espaciais e temporais são adequadas para o encadeamento de modelos climáticos e hidrológicos.
- Conhecer o desempenho de métodos de correção dos erros sistemáticos na previsão climática em bacias hidrográficas andinas, com alta variabilidade climática e latitude quase zero, ainda que os RCM apresentem superestimções ou subestimções na previsão da precipitação; porém, um dos principais desafios é a correção dos erros sistemáticos da precipitação baseados na climatologia observada e prevista.
- A escolha de um período de previsão climática e modelagem hidrológica curta faz com que os efeitos de mudanças climáticas nos recursos hídricos sejam leves, evitando-se incertezas adicionais nos resultados.

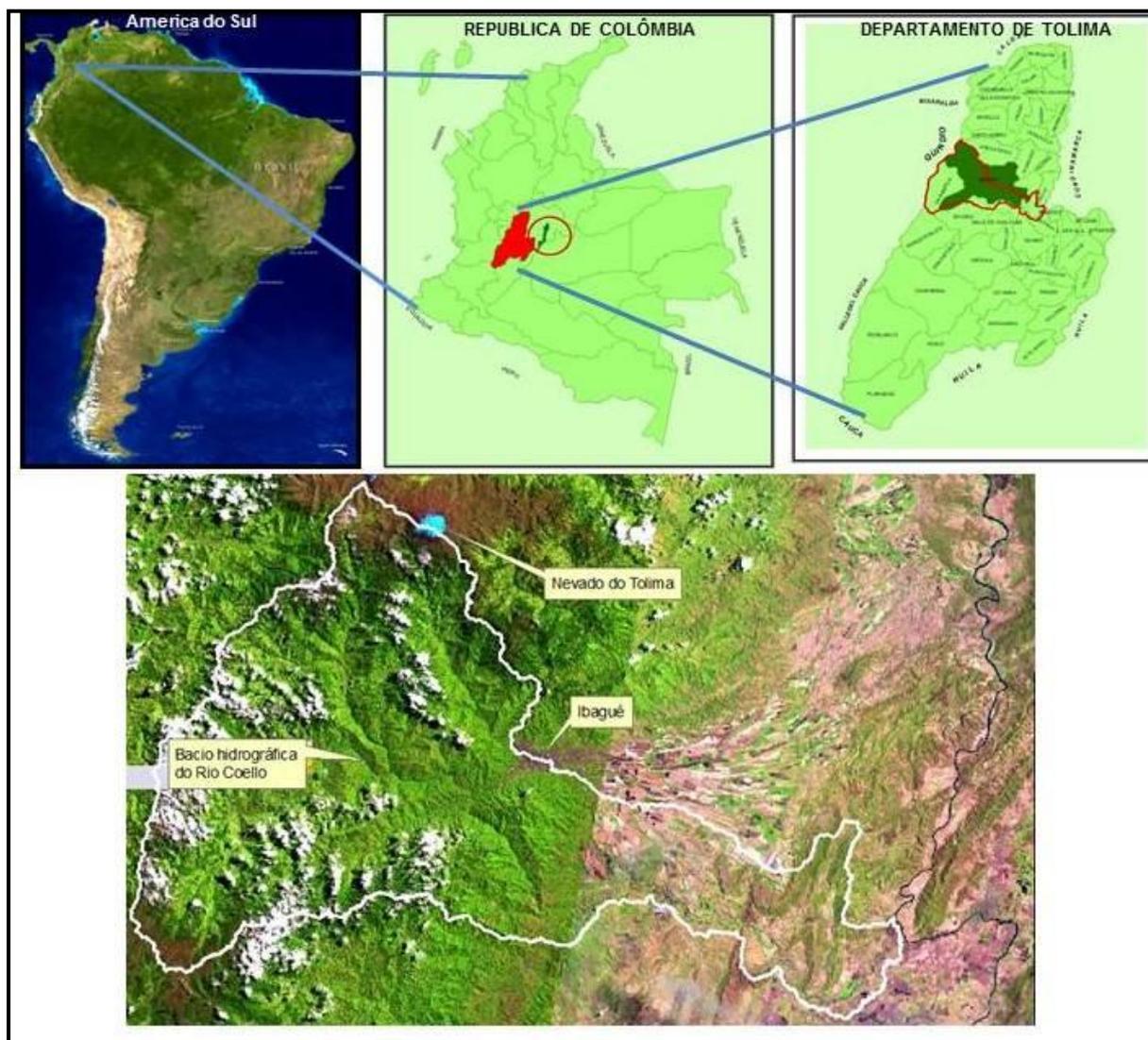
## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Área de estudo

Um aspecto inovador deste trabalho é a adoção de uma bacia andina para avaliar os efeitos de eventuais mudanças climáticas em uma bacia hidrográfica mediante a combinação de cenários de gases de efeito estufa derivados das saídas de GCM e RCM com o modelo SWAT. Foi escolhida a bacia hidrográfica do rio Coello (BHRC) como estudo de caso pelas seguintes razões: a) a BHRC corresponde a 6% da oferta hídrica do Departamento de Tolima e fornece água a 60% de população do Departamento; b) a BHRC é um exemplo de área crítica quanto à ocorrência de usos competitivos (agrícola-urbano) e degradação ambiental decorrente do uso agrícola intensivo (erosão acelerada devido à sobreutilização); c) a BHRC é historicamente considerada o cinturão verde dos municípios de Cajamarca, Coello, Espinal, Flandes, Ibagué, Rovira e San Luis, o que ressalta a importância da disponibilidade dos recursos hídricos em qualidade e quantidade; e d) a BHRC possui os dados requeridos para desenvolver a pesquisa. Ressalta-se que existe uma preocupação política e da sociedade civil do Departamento de Tolima em relação ao futuro dos recursos hídricos nessa bacia, o que facilita a tomada de decisões e o financiamento de atividades ou projetos de adaptação ou mitigação de impactos de mudanças climáticas.

A área de estudo selecionada localiza-se na vertente oriental da Cordilheira Andina Central, na República da Colômbia, Departamento de Tolima, e engloba os já citados municípios. O rio Coello nasce a uma altitude de 5.200 m, entre as latitudes 75° 36' 0" e 75° 52' 0" Norte e as longitudes 4° 10' 0" e 4° 44' 0" Oeste, possui 124,76 km de comprimento e sua área de drenagem é de 1.816,70 km<sup>2</sup>, o que correspondente a 7,7% da área total do Departamento de Tolima. Na Figura 4.1 ilustra-se a localização da BHRC.

Segundo CORTOLIMA (2005), a população estabelecida na bacia hidrográfica é de 283.506 habitantes, dos quais 85,72% moram nas sedes de municípios. A densidade demográfica é de 23 hab/km<sup>2</sup>. A principal atividade econômica na bacia hidrográfica é a agropecuária. A produção agrícola é principalmente de arroz, milho, café, banana-da-terra, banana, feijão, mandioca, sorgo e hortaliças. Na pecuária predominam as criações de bovinos, galináceos e suínos. Recentemente começou a extração de ouro nas imediações da área rural da parte nordeste da bacia hidrográfica, no município de Cajamarca, o que tem gerado importantes mudanças na estrutura social e econômica da população.



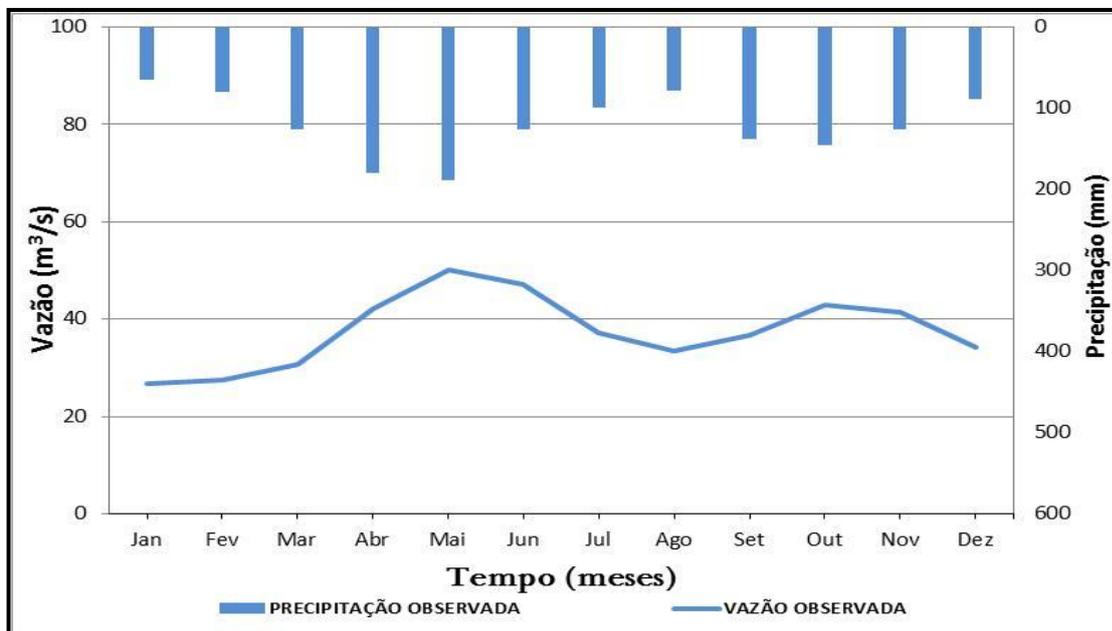
**Figura 4.1** – Localização da área de estudo

#### 4.1.1 Climatologia

De acordo com CORTOLIMA (2005), a BHRC apresenta temperatura média anual variando entre 9,3 °C e 28,6 °C, sendo as menores temperaturas encontradas na porção norte da bacia hidrográfica devido à orografia e maiores latitudes, ocorrendo um aumento da temperatura à medida que se alcançam latitudes mais baixas, especialmente no setor sul da bacia. Esses valores indicam a presença de temperaturas de medianas a elevadas durante quase todo o ano. Destacam-se os meses de fevereiro, março, junho, julho e agosto como os mais quentes, apresentando médias máximas variando entre 20,0 °C e 28,6 °C.

CORTOLIMA (2005) relata que os totais pluviométricos médios anuais variam de 2.231 mm, na parte média da BHRC, a 1.074 mm, na região próxima ao páramo de Anaime. O regime de chuvas é bimodal, com a primeira estação chuvosa ocorrendo nos meses de março, abril, maio e junho, e a segunda nos meses de setembro, outubro e novembro. Assim,

são considerados meses de precipitações relativamente mais baixas dezembro, janeiro, fevereiro, julho e agosto. A BHRC apresenta uma precipitação média anual de 1.456 mm e uma evapotranspiração potencial média anual de 1.399 mm; as vazões médias mensais apresentam um comportamento similar ao das chuvas, como se pode verificar na Figura 4.2.



**Figura 4.2** – Precipitação e hidrograma de vazões médias mensais observadas na BHRC no período 1988-2007

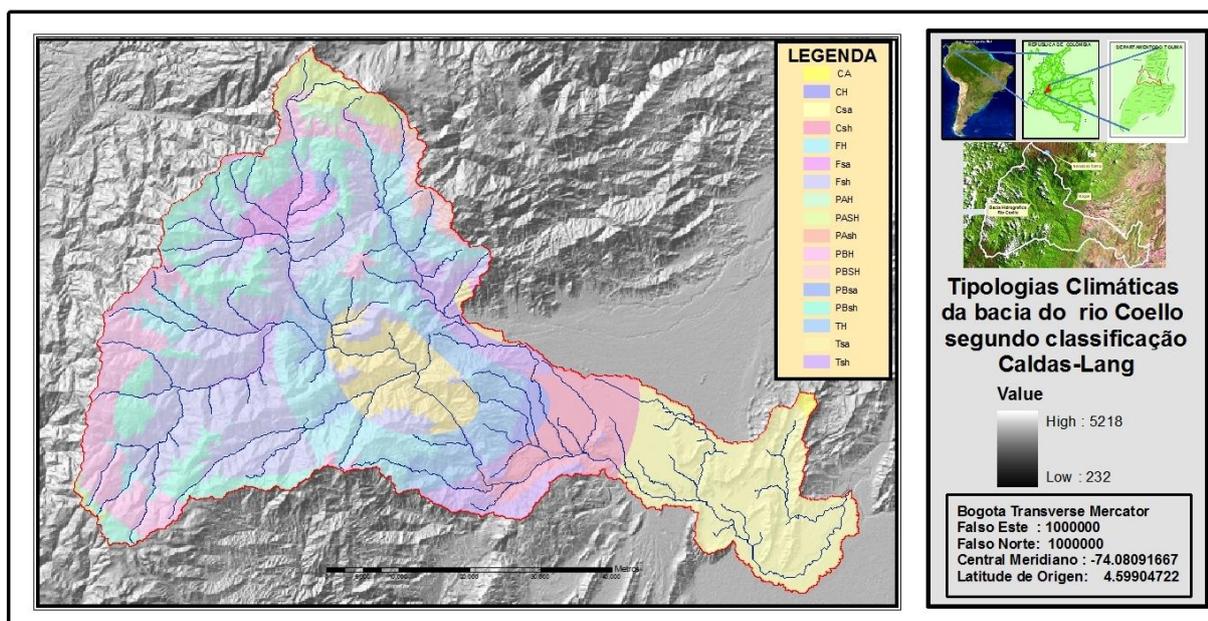
Segundo Valencia (2008), a classificação climática da Colômbia tem sido elaborada por diversos pesquisadores, com a utilização de diferentes classificações reconhecidas no mundo, tais como as de Köeppen, Thornthwaite, Caldas-Lang, Martone e Holdridge, dentre outras. Em geral, essas classificações estão baseadas no comportamento médio de variáveis climatológicas, como a precipitação e a temperatura.

A classificação de Caldas-Lang foi inicialmente desenvolvida por Caldas, no ano de 1802. Já no ano de 1962, Schaufelberguer uniu a classificação de Lang com a classificação de Caldas, obtendo 25 tipos de clima, levando-se em conta a elevação sobre o nível do mar, a temperatura média anual e a precipitação média anual (GUTIÉRREZ-REY, 1991).

Embora de uso relativamente restrito no Brasil, a classificação climática de Caldas-Lang é extensivamente utilizada na Colômbia, por representar as condições de umidade dos diferentes pisos térmicos do país. Neste trabalho optou-se pelo uso dessa classificação devido à existência de informação climática requerida para adequar a metodologia proposta.

O termo páramo, encontrado na classificação climática de Caldas-Lang e de frequente uso na Colômbia, não é utilizado no Brasil, existindo uma dificuldade para a sua tradução para a língua portuguesa. Segundo Cuatrecasas (1958) *apud* Ministerio del Medio Ambiente de Colombia (2002), os páramos são extensas regiões que se encontram acima do bosque alto andino, nas partes mais elevadas da cordilheira dos Andes (Venezuela, Colômbia e Equador), a partir de 3800 acima do nível do mar. São áreas frias e úmidas, onde acontecem câmbios meteorológicos bruscos. Normalmente estão cobertos de neblina e recebem precipitações frequentes e fortes ventos. Os dias frios e úmidos podem alternar-se com dias quentes e/ou dias de sol. Geralmente as noites são frias e frequentemente ocorrem nevascas (nas partes mais altas). Os solos estão geralmente saturados e a vegetação é escassa.

De acordo com CORTOLIMA (2005), na BHRC são encontradas dezessete tipologias climáticas, seguindo a classificação de Caldas-Lang. Na Figura 4.3 são mostradas as tipologias climáticas; além disso, na Tabela 4.1 são descritas essas tipologias.



**Figura 4.3** – Tipologias climáticas da BHRC segundo a classificação de Caldas-Lang (Fonte: CORTOLIMA, 2005)

#### 4.1.2 Uso e cobertura do solo

A cobertura do solo pode ser considerada um importante indicador das condições ambientais de uma região ou bacia hidrográfica, pois protege o solo e reduz o transporte de sedimentos. Entretanto, nas últimas décadas na BHRC, as pressões antrópicas têm ocasionado a substituição da paisagem natural por outros tipos de cobertura e usos do solo.

**Tabela 4.1 – Províncias climáticas na BHRC (segundo Caldas-Lang)**

Província climática	Símbolo	Descrição
Páramo alto superúmido	PASH	Altura superior a 3700 msnm, temperatura inferior a 7 °C e índice de Lang maior do que 160; localiza-se a nordeste da bacia, especialmente no município de Ibagué
Páramo alto úmido	PAH	Altura superior a 3700 msnm, temperatura inferior a 7 °C e índice de Lang entre 100 e 160; vegetação típica de páramo
Páramo alto semiúmido	PAsh	Altura superior a 3700 msnm, temperatura inferior a 7 °C e índice de Lang entre 60 e 100
Páramo baixo superúmido	PBSH	Altura entre 3200 e 3700 msnm, temperatura entre 7 °C e 12 °C, e índice de Lang maior do que 160
Páramo baixo úmido	PBH	Altura entre 3200 e 3700 msnm, temperatura entre 7 °C e 12 °C, e índice de Lang entre 100 e 160
Páramo baixo semiúmido	Pbs	Altura entre os 3200 e 3700 msnm, temperatura entre 7 °C e 12 °C, e índice de Lang entre 60 e 100
Páramo baixo semiárido	PBSa	Altura entre 3200 e 3700 msnm, temperatura entre 7 °C e 12 °C, e índice de Lang entre 40 e 60
Frio úmido	FH	Altura entre 2000 e 3000 msnm, temperatura entre 12 °C e 17,5 °C, e índice de Lang entre 100 e 160
Frio semiúmido	Fsh	Altura entre 2000 e 3000 msnm, temperatura entre 12 °C e 17,5 °C, e índice de Lang entre 60 e 100
Frio semiárido	Fsa	Altura entre 2000 e 3000 msnm, temperatura entre 12 °C e 17,5 °C, e índice de Lang entre 40 e 60
Temperado úmido	TH	Altura entre 1000 e 2000 msnm, temperatura entre 17,5 °C e 24 °C, e índice de Lang entre 100 e 160
Temperado semiúmido	Tsh	Altura entre 1000 e 2000 msnm, temperatura entre 17,5 °C e 24 °C, e índice de Lang entre 60 e 100
Temperado semiárido	Tsa	Altura entre 1000 e 2000 msnm, temperatura entre 17,5 °C e 24 °C, e índice de Lang entre 40 e 60
Quente úmido	CH	Altura entre 0 e 1000 msnm, temperatura superior a 24 °C e índice de Lang entre 100 e 160
Quente semiúmido	Csh	Altura entre 0 e 1000 msnm, temperatura superior a 24 °C e índice de Lang entre 60 e 100
Quente semiárido	Csa	Altura entre 0 e 1000 msnm, temperatura superior a 24 °C e índice de Lang entre 40 e 60
Quente árido	Ca	Altura entre 0 e 1000 msnm, temperatura superior a 24 °C e índice de Lang entre 20 e 40

Atualmente, devido ao processo de expansão agrícola, a BHRC é caracterizada pela ampla presença de atividades agrícolas e pecuárias, restando poucas áreas com vegetação natural.

Na caracterização das coberturas vegetais e usos do solo utilizou-se a metodologia *Corine Land Cover*, gerada pela Comunidade Europeia para ecossistemas europeus e africanos; a metodologia foi posteriormente adaptada para ecossistemas tropicais na Ásia e nas Américas; além disso, esse sistema de classificação foi homologado para os ecossistemas da Colômbia na escala 1:25000 no ano de 2009 pelo *Instituto Geográfico Agustín Codazzi* (IGAC).

Neste trabalho foram considerados todos os tipos de cobertura vegetal e usos do solo presentes na bacia hidrográfica em função da metodologia adaptada de *Corin Land Cover*

para a Colômbia; por isso, foram obtidas quatro classes (vinte e duas subclasses) de coberturas e usos do solo para a BHRC, as quais são apresentadas na Figura 4.4.

A seguir é apresentada uma breve descrição das características principais das quatro classes de cobertura e usos do solo:

- **Territórios artificializados:** Nesta classe foram agrupadas áreas de cidades, povoados e áreas periféricas que estão sendo incorporadas a zonas urbanas por meio de um processo gradual de urbanização ou de mudança de uso do solo; engloba subclasses como zonas urbanas, instalações recreativas e zonas militares.
- **Territórios agrícolas:** Compreendem áreas dedicadas principalmente à produção de alimentos, fibras e outras matérias primas industriais; nesta categoria podem ser encontradas subclasses como: cultivos anuais ou transitórios, cultivos permanentes ou semipermanentes, mosaico de cultivos, e pastos e espaços naturais.
- **Bosques e áreas seminaturais:** Classe que representa um grupo de cobertura vegetal de tipo boscoso, arbustiva e herbácea desenvolvida sobre diferentes substratos e pisos altitudinais; engloba subclasses como: bosque protetor potencialmente produtor, bosque produtor, arbustos e matos, pasto e árvores, pastos manejados, pastos naturais, pastos com restolho ou mato, restolho, vegetação de páramo, vegetação rupícola, afloramento rochoso, áreas abertas sem ou com pouca vegetação, terras degradadas, e terra de neves ou glaciares.
- **Superfícies de água:** Correspondem aos corpos de água permanentes como rios, lagos, lagoas e represas.

A vegetação original, devido à evolução do uso e à ocupação do solo na área de estudo, encontra-se apenas em algumas grotas e nas margens do rio Coello (20,89%). As culturas dos plantios anuais ou transitórios (arroz, milho e soja) localizam-se em uma boa parte da bacia hidrográfica (9,07%), em terrenos de menor declividade, enquanto as encostas mais íngremes são ocupadas com cultivos, pastagens e espaços naturais (9,30%). Na Tabela 4.2 são apresentadas as classes e subclasses de uso e cobertura do solo e as respectivas áreas que cada uso do solo ocupa na BHRC.

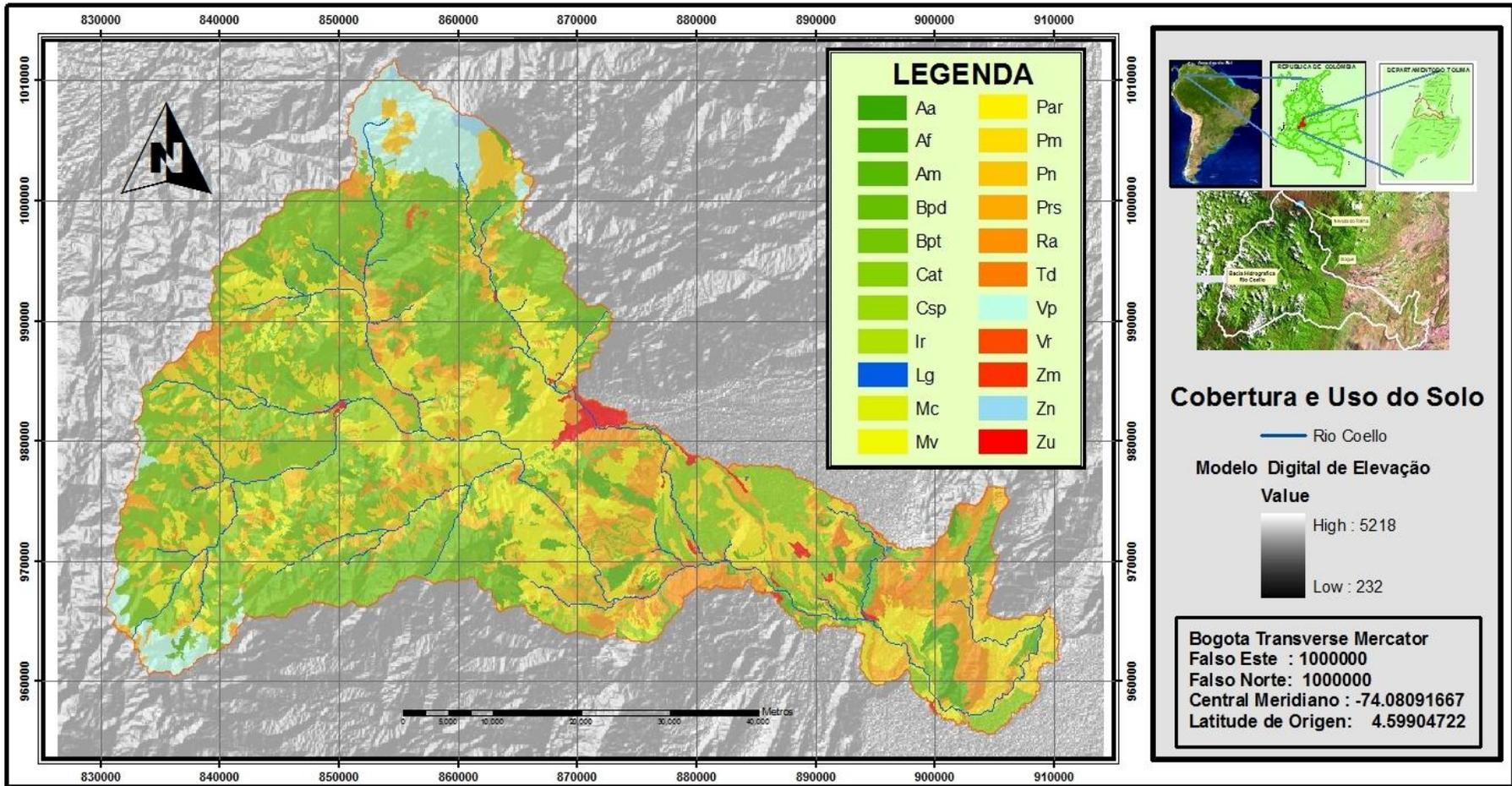


Figura 4.4 – Mapa de uso e ocupação do solo da BHRC

**Tabela 4.2 – Áreas, em hectares (ha) e porcentagem (%), das subclasses de uso e ocupação do solo na BHRC**

Código	Classe e subclasse	Símbolo	Área	
			ha	%
1	<b>Territórios artificializados</b>			
1.1	Zonas urbanas	Zu	2001,62	1,10
1.2	Instalações recreativas	Ir	107,85	0,06
1.3	Zona Militar	Zm	38,78	0,02
2	<b>Territórios agrícolas</b>			
2.1	Cultivos anuais ou transitórios	Cat	16474,65	9,07
2.2	Cultivos permanentes e semipermanentes	Csp	2218,11	1,22
2.3	Mosaico de cultivos	Mc	4787,20	2,64
2.4	Mosaico de cultivos, pastos e espaços naturais	Mv	16900,97	9,30
3	<b>Bosques e áreas seminaturais</b>			
3.1	<b>Bosques</b>			
3.1.1	Bosque protetor potencialmente produtor	Bpd	15559,52	8,56
3.1.2	Bosque produtor	Bpt	37947,27	20,89
3.2	<b>Áreas com vegetação herbácea ou arbustiva</b>			
3.2.1	Arbustos e matos	Am	10710,27	5,90
3.2.2	Pastos e árvores	Par	9398,10	5,17
3.2.3	Pastos manejados	Pm	17600,58	9,69
3.2.4	Pastos naturais	Pn	11049,10	6,08
3.2.5	Pastos com restolho ou mato	Prs	12021,08	6,62
3.2.6	Restolho	Ra	11848,46	6,52
3.2.7	Vegetação de páramo	Vp	9665,94	5,32
3.2.8	Vegetação rupícola	Vr	127,63	0,07
3.3	<b>Áreas abertas ou com pouca vegetação</b>			
3.3.1	Afloramento rochoso	Af	1771,19	0,97
3.3.2	Áreas abertas sem ou com pouca vegetação	Aa	179,17	0,10
3.3.3	Terras degradadas	Td	759,72	0,42
3.3.4	Zonas de neves ou glaciais	Zn	470,17	0,26
4	<b>Superfícies de água</b>			
4.1	Lagoa	Lg	32,48	0,02

#### 4.1.3 Solos

Segundo Malagón (1998), logo após a publicação do *Soil Survey Manual* (*Soil Survey Staff*, 1951) nos Estados Unidos da América, que permite a definição de normas e especificações para adiantar levantamentos de solos, foram iniciados na Colômbia os trabalhos de solos. Hoje, a taxonomia de solos aplicada no país é a *Soil Taxonomy – Soil Survey Staff* (1975; 1996), que tem permitido definir e gerar cartografia dos solos colombianos.

De acordo com a metodologia de classificação de solos utilizadas no país e descrita anteriormente, ocorrem na bacia em estudo solos das ordens Alfisolos, Andisolos, Entisolos, Inceptisolos e Molisolos, conforme descrições a seguir:

- **Alfisolos:** Esta classe é denominada comumente como solos lavados devido aos seus horizontes superficiais. Localizam-se em regiões áridas, semiáridas e úmidas. Sua

característica mais importante é a presença de argila no horizonte B; têm uma fertilidade natural entre moderada e alta e são geralmente pobres em matéria orgânica.

- **Andisolos:** Estes solos são derivados de materiais vulcânicos, especialmente de cinzas vulcânicas. Caracterizam-se por apresentar baixa densidade aparente, alta retenção de fósforo e alto conteúdo de vidro vulcânico; geralmente situam-se em regiões úmidas e subúmidas da bacia hidrográfica e apresentam uma boa acumulação de húmus. São solos característicos das regiões vulcânicas dos Andes, América Central e alguns países do mediterrâneo.
- **Entisolos:** São solos jovens ou pouco evoluídos, com pequena diferenciação de horizontes; não apresentam desenvolvimento pedogenético; geralmente sua evolução limita-se a uma alteração débil do material parental. São os mais frequentes na área de estudo, localizando-se em todos os climas e paisagens; são profundos, permeáveis, de textura arenosa, de conteúdo de argila muito baixo e de baixa fertilidade.
- **Inceptisolos:** São solos imaturos de horizontes alterados que têm sofrido perda de bases, ferro, alumínio e mantêm reserva de minerais meteorizados; localizam-se em áreas de baixas temperaturas e climas úmidos; além disso, apresentam uma baixa taxa de decomposição da matéria orgânica devido às baixas temperaturas; em climas quentes, a decomposição da matéria orgânica é maior.
- **Molissolos:** São solos superficiais a moderadamente profundos, desenvolvidos de materiais vulcânicos e sedimentários; têm horizontes superficiais bem desenvolvidos, dotados principalmente de cálcio e magnésio.

A BHRC tem grande heterogeneidade quanto aos tipos de solo, possuindo vinte e cinco subclasses de solo, cujas caracterizações sumárias (IGAC, 1997) são descritas na Tabela 4.3. Os valores das áreas de predomínio das classes de solos originais e refinadas são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 4.4 e 4.5 e o mapa de solos é mostrado na Figura 4.5. Os solos MKB ocorrem em 33,35% da área total da BHRC, onde estão bosques naturais, cultivos permanentes e semipermanentes, pastagens, entre outros. Para as classes de solo refinadas observam-se duas regiões bem distintas: de montanha e de planalto. Na primeira podem ser encontrados cultivos de café, milho, batata, banana-da-terra, feijão, mandioca e hortaliças, enquanto na segunda, com solos de melhor aptidão agrícola, são encontradas grandes plantações de soja, algodão, milho, arroz, manga, entre outras.

**Tabela 4.3 – Blocos de tipos de solos da BHRC**

<b>Símbolo</b>	<b>Ordem</b>	<b>Descrição</b>
MDA	Entisolos	Localiza-se nas regiões de maior altitude e próxima aos nevados. Apresenta relevo que pode variar de ondulado a fortemente escarpado e também inclinações muito variáveis, desde 12% até superiores a 75%
MDB	Entisolos	Situa-se nas regiões de maior altitude e próxima aos nevados. O relevo pode variar de ondulado a fortemente escarpado e possui inclinações muito variáveis, desde 12% até superiores a 75%
MGA	Andisolos	Apresenta-se principalmente no município de Cajamarca, em áreas com influência de cinzas vulcânicas. Ocupam a posição de fila e vigas de montanha, com relevo segmentado a escarpado e inclinações longas
MGB	Entisolos	Localiza-se na paisagem montanhosa em alturas entre 3.200 e 3.700 m. Possui relevo escarpado a muito escarpado, com inclinações de 50% a 75%
MGC	Andisolos	Encontra-se em clima muito frio e úmido nas regiões altas do município de Cajamarca; corresponde ao relevo de tipo de colinas, caracterizado por domos arredondados e alongados, com inclinações de 7 a 12%
MKB	Andisolos	Localiza-se nos municípios de Cajamarca e Ibagué, em altitudes de 2.000 a 2.800 m e declividades superiores a 50%
MKG	Andisolos	Apresenta relevo de colinas, caracterizado pelas elevações de terreno de pouca altitude e de configuração alongada; é fortemente ondulado a quebrado, com inclinações de 7 a 50%
MKI	Inceptisolos	Localiza-se no tipo de relevo de leques hidrovolcânicos, com inclinações de 3 a 7%
MQC	Inceptisolos	Situa-se no tipo de relevo de filas e vigas, nos municípios de Ibagué e Cajamarca, com inclinações acima de 50%
MQD	Inceptisolos	Encontra-se no município de Ibagué, no tipo de relevo de filas e vigas, com inclinações de 25 a 75%
MQE	Entisolos	Localiza-se nas partes baixas da Cordilheira Central e se caracteriza pelo seu relevo escarpado e inclinações superiores a 50%
MQH	Inceptisolos	Apresenta-se na maioria dos tipos de relevos de filas e vigas; o relevo é levemente quebrado a escarpado, com inclinações de 12 a 75%
MQJ	Entisolos	Localiza-se ao longo dos rios Toche e Bermellón; o relevo é muito escarpado e as inclinações são superiores a 75%
MQO	Entisolos	Encontra-se no tipo de relevo de vales, de clima meio úmido e muito úmido, com relevo de inclinações de 3 a 7%
MWA	Entisolos	Localiza-se entre altitudes de 400 a 900 m, na parte oriental do Departamento, em relevo de espinhaço e escarpado
MWC	Inceptisolos	Localiza-se sobre rocha sedimentar argilosa e arenítica; o relevo é fortemente quebrado, com inclinações entre 25 e 75%
MWD	Entisolos	Situa-se em relevos montanhosos localizados ao longo do rio Combeima, em relevo com inclinações superiores a 75%
MWI	Inceptisolos	Localiza-se em colinas com relevo ondulado a quebrado e inclinações de 25 a 50%
MWJ	Molisolos	Encontra-se nos contrafortes da Cordilheira Central em relevo denominado colinas, com inclinações curtas dominantes de 7 a 50%
PWD	Alfisolos	Apresenta-se em clima médio úmido e clima seco onde têm evoluído a partir da lava de aglomerados de origem vulcânica, com declividade de 7%
PWF	Entisolos	Apresenta-se nos vales recentes de Alvarado e Venadillo; o material é constituído pelos fluxos das lavas provenientes do vulcão de Tolima
PWH	Entisolos	Situa-se em altitudes compreendidas entre 300 e 700 m, com declividades inferiores a 25%; o material é composto de blocos de rocha vulcânica
PWK	Inceptisolos	Localiza-se na parte baixa da bacia hidrográfica, em inclinações inferiores a 7%; o material é constituído por sedimentos aluviais recentes
PWL	Alfisolos	Apresenta-se ao longo dos vales estreitos que atravessam a Cordilheira Central; o relevo é plano a levemente plano, com declividades inferiores a 7%
VWA	Inceptisolos	Situa-se ao longo do rio Magdalena onde o solo tem evoluído a partir das aluviões recentes; o relevo é plano a levemente plano, com declividades inferiores a 7%

**Tabela 4.4 – Classes de solos originais e áreas, em hectares (ha) e porcentagem (%) da área total da BHRC**

Tipo de solo	Área		Tipo de solo	Área	
	ha	%		ha	%
MDAd	2762,14	1,51	MQEg2	3532,51	1,93
MDAe	468,88	0,26	MQHe1	127,78	0,07
MDAg	3222,41	1,76	MQJg1	2110,93	1,16
MDBe	100,73	0,06	MQObp	963,15	0,53
MDBf	312,43	0,17	MWaf2	7146,28	3,91
MGAf	10834,01	5,93	MWaf3	2864,93	1,57
MGAf1	116,79	0,06	MWAg3	753,71	0,41
MGAf1	5126,83	2,81	MWCe3	211,79	0,12
MGBg	7785,96	4,26	MWDg2	2361,53	1,29
MGCd	444,68	0,24	MWId2	721,52	0,40
MGCe	7468,88	4,09	MWle2	1245,06	0,68
MGCe1	46,19	0,03	MWJc1	138,58	0,08
MKBf1	60912,55	33,35	MWJd2	519,23	0,28
MKGc	120,84	0,07	PWDb1	12368,90	6,77
MKGd	119,34	0,07	PWfa	715,02	0,39
MKGe1	439,86	0,24	PWFb1	421,48	0,23
MKIb	218,01	0,12	PWHc2	802,37	0,44
MKIbp	433,67	0,24	PWka	5869,51	3,21
MQCf1	14551,83	7,97	PWLap	1615,81	0,88
MQDf1	12717,42	6,96	PWLb	157,44	0,09
MQDg1	3200,54	1,75	PWLbp	531,11	0,29
MQEf2	3527,81	1,93	VWAa	709,11	0,39

**Tabela 4.5 – Classes de solos refinadas e áreas, em hectares (ha) e porcentagem (%) da área total da BHRC**

Tipo de solo	Área	
	ha	%
MDA	6453,43	3,53
MDB	413,16	0,23
MGA	16077,63	8,80
MGB	7785,96	4,26
MGC	7959,75	4,36
MKB	60912,55	33,35
MKG	680,04	0,37
MKI	651,68	0,36
MQC	14551,83	7,97
MQD	15917,96	8,72
MQE	7060,31	3,87
MQH	127,78	0,07
MQJ	2110,93	1,16
MQO	963,15	0,53
MWA	10764,93	5,89
MWC	211,79	0,12
MWD	2361,53	1,29
MWI	1966,58	1,08
MWJ	657,81	0,36
PWD	12368,90	6,77
PWF	1136,51	0,62
PWH	802,37	0,44
PWK	5869,51	3,21
PWL	2304,36	1,26
VWA	709,11	0,39

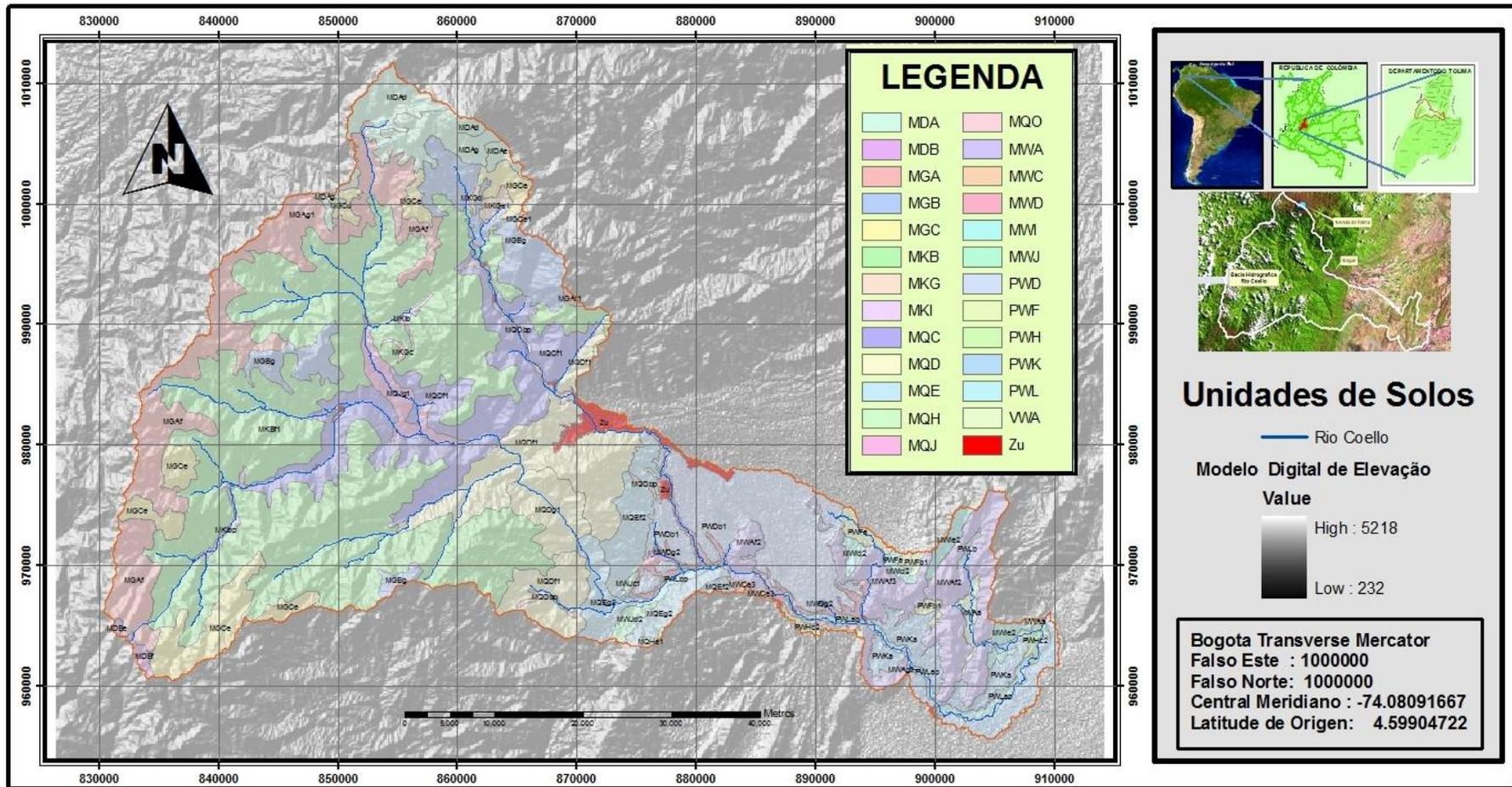


Figura 4.5 – Mapa de solos da BHRC (Fonte: Adaptada de IGAC, 2007)

## 4.2 Materiais

### 4.2.1 Material cartográfico

Para a execução deste trabalho foram consultados os seguintes materiais cartográficos:

1. Cartas planialtimétricas do Plano Cartográfico do Departamento de Tolima, do IGAC, da Colômbia, na escala 1:25.000. As cartas planialtimétricas utilizadas nesta pesquisa estão apresentadas na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6 – Cartas planialtimétricas da BHRC**

Folha	Nomenclatura	Ano
1	225-IV-C	1994
2	225-IV-D	1991
3	226-III-C	1991
4	225-III-D	1991
5	244-I-B	1974
6	244-II-A	1999
7	244-II-B	1967
8	245-I-A	1991
9	245-I-B	1991
10	244-I-D	1974
11	244-II-C	1991
12	244-II-D	1991
13	254-I-C	1993
14	245-I-D	1982
15	244-III-B	1991
16	244-IV-A	1991
17	244-IV-B	1991
18	245-III-A	1991
19	245-III-B	1991
20	244-III-D	1991
21	244-IV-C	1991
22	244-IV-D	1982
23	245-III-C	1991
24	245-III-D	1994

2. Cartas pedológicas semidetalhadas do *Estudio general de suelos y tierras para la zonificación del departamento del Tolima*, do IGAC, de 1997.

### 4.2.2 Imagens de satélite

Foram consultadas duas imagens do satélite SPOT-4, de resolução espacial de 20 m, tomadas em janeiro de 2003, com quatro bandas espectrais:

- B1 (verde) (0,50-0,59  $\mu\text{m}$ );

- B2 (vermelho) (0,61-0,68  $\mu\text{m}$ );
- B3 (infravermelho próximo) (0,79-0,89  $\mu\text{m}$ ); e
- B4 (infravermelho médio) (1,58-1,75  $\mu\text{m}$ ).

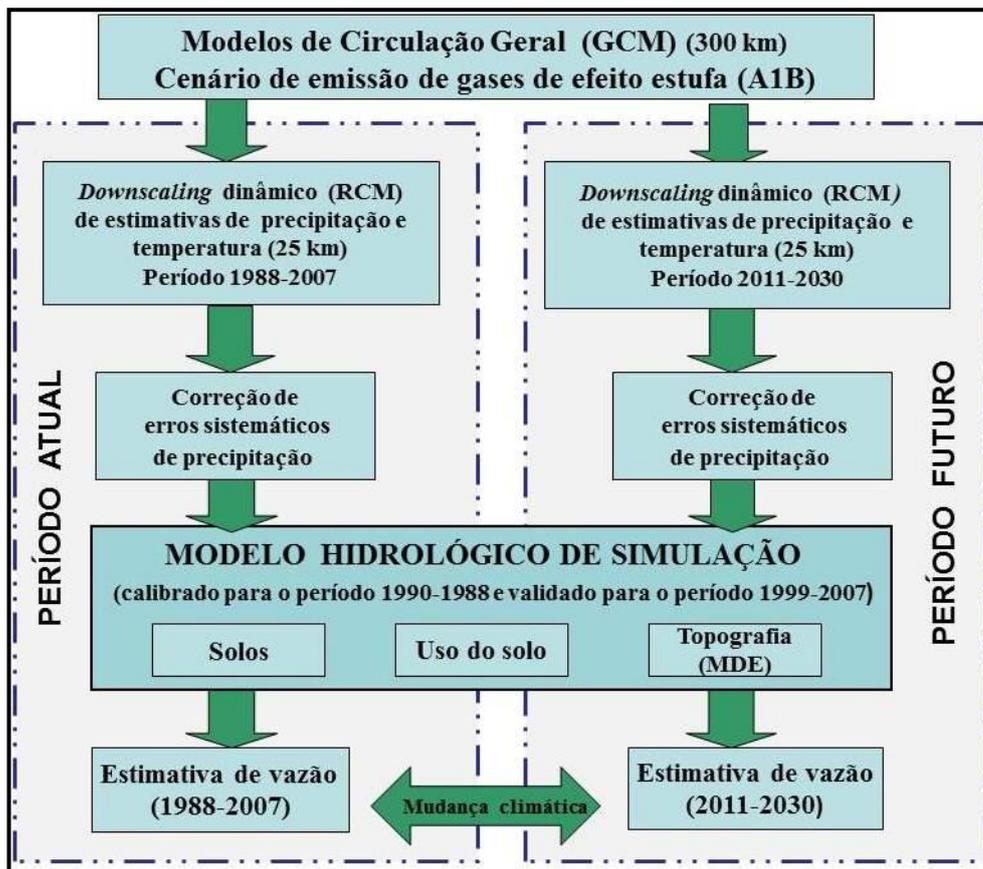
#### 4.2.3 Sistemas computacionais

Os seguintes programas foram utilizados para geração e edição dos dados de entrada do modelo SWAT:

1. *Software ArcGis v. 9.3<sup>®</sup>*, desenvolvido pela *Environmental Systems Research Institute*, Redlands, Estados Unidos da América.
2. Extensões *ArcGis Spatial Analyst v. 9.3<sup>®</sup>* e *3D Analyst v. 9.3<sup>®</sup>*, desenvolvidas pela *Environmental Systems Research Institute*, Redlands, Estados Unidos da América.
3. SWAT 2005 v. 2.3.4<sup>®</sup>, desenvolvido pelo *Blackland Research Center* da *Texas Agricultural Experiment Station* e *Agricultural Research Service*, Estados Unidos da América.
4. Erdas Imagine v. 8.2<sup>®</sup>, desenvolvido pela ERDAS, Inc.
5. *Software ArcInfo v. 9.2<sup>®</sup>*, desenvolvido pela *Environmental Systems Research Institute*, Redlands, Estados Unidos da América.
6. Modelo PRECIS, v. 1.6.1<sup>®</sup>, desenvolvido pelo *Hadley Centre for Climate Prediction and Research* da oficina de meteorologia do Reino Unido.
7. LinuxSuSe v. 11.2<sup>®</sup>, desenvolvido pela Novell.
8. *Software GrADS (Grid Analysis and Display System)*, desenvolvido pelo *Institute of Global Environmental and Society* e pelo *Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies*, do Reino Unido.

### 4.3 Metodologia

Para avaliar os efeitos de eventuais mudanças climáticas na hidrologia na BHRC decidiu-se adaptar a proposta metodológica desenvolvida por Quilbé *et al.* (2008). Na Figura 4.6 apresenta-se o plano metodológico utilizado nesta pesquisa.



**Figura 4.6** – Fluxograma representativo da metodologia (Fonte: adaptada de QUILBÉ *et al.*, 2008)

O enfoque metodológico tem como finalidade aumentar a capacidade de previsão e detalhar os procedimentos ou encadeamentos de modelos climáticos e hidrológico; os primeiros preveem a precipitação e as variáveis climáticas mediante a combinação de cenários de gases de efeito estufa derivados das saídas de um Modelo de Circulação Geral e um Modelo de Circulação Regional; e o segundo reproduz as vazões nos rios por meio de uma acoplagem *off-line* com um RCM.

As diferenças do enfoque metodológico proposto em relação à metodologia apresentada por Quilbé *et al.* (2008) são as seguintes:

- No enfoque metodológico proposto na presente pesquisa mudou-se a técnica de *downscaling* estatístico proposto por Quilbé *et al.* (2008) para *downscaling* dinâmico, porque em bacias hidrográficas onde o escoamento não está associado ao derretimento da neve, os resultados da utilização do *downscaling* estatístico podem ser pobres (Diaz-Nieto & Wilby, 2005).

- A utilização de modelos de circulação geral em nível de bacia hidrográfica para prever variáveis da superfície terrestre, como a precipitação, não apresenta bons resultados; portanto, no enfoque metodológico proposto na presente pesquisa adotou-se um modelo de circulação regional com a finalidade de responder aos forçantes locais da BHRC.
- No enfoque metodológico proposto por Quilbé *et al.* (2008) utilizou-se o modelo hidrológico semidistribuído HYDROTEL. Na metodologia proposta para a BHRC adotou-se um modelo hidrológico testado em diferentes condições climáticas e fisiográficas, inclusive naquelas da região andina colombiana.
- Em virtude das incertezas próprias dos modelos globais para prever mudanças climáticas, em níveis regional e local, diferentemente de Quilbé *et al.* (2008), decidiu-se por não avaliar o efeito de cenários do uso do solo na mitigação de mudanças climáticas.

Assim, o enfoque metodológico proposto para o desenvolvimento da presente pesquisa pode ser sintetizado nas seguintes etapas:

- Previsão climática: nesta etapa são estimados valores de variáveis climáticas na BHRC associados a um cenário de emissão de gases de efeito estufa por meio do uso das saídas de um GCM como condições de contorno ou laterais de um RCM, de maior nível de detalhe, seguindo um *downscaling* dinâmico. Os valores de precipitação são corrigidos devido a erros sistemáticos.
- Modelagem hidrológica: um modelo hidrológico de tipo chuva-vazão é calibrado e validado de forma a se obter uma ferramenta que permita estimar componentes do ciclo hidrológico em pontos de interesse da BHRC.
- Previsões de vazões com base nos dados climáticos do RCM: os valores climáticos gerados pelo RCM podem ser utilizados como dados de entrada do modelo hidrológico – considerando que o modelo calibrado e validado é uma representação da BHRC – para estimar valores de vazão.
- Avaliação dos possíveis efeitos das mudanças climáticas nos recursos hídricos: as saídas das variáveis climáticas do RCM para um período atual e outro futuro são

utilizadas como dados de entrada do modelo hidrológico (previamente calibrado e validado), cujas saídas para esses dois períodos são analisadas para identificar possíveis impactos sobre os recursos hídricos da BHRC.

A seguir são descritas em detalhes as etapas do enfoque metodológico proposto.

#### **4.3.1 Previsão climática**

O método do *downscaling* dinâmico ou redução de escala é utilizado para realizar o aninhamento ou acoplagem entre um GCM e um RCM; as saídas do primeiro são usadas no segundo para definir as condições de contorno atmosféricas. Teoricamente esse método tem a capacidade de representar a dinâmica superfície-atmosfera em escalas mais finas; o método precisa de grandes recursos computacionais, pois requer capturar variações na orografia e na precipitação em nível regional (WOOD *et al.*, 1997).

A previsão das variáveis climáticas trata da transferência dos arquivos do GCM e da estimativa dessas variáveis pelo RCM dentro da área da BHRC. A previsão quantitativa de precipitação e temperatura, gerada diariamente pelo RCM, envolve as etapas de obtenção dos dados do GCM, o *downscaling* dos dados para a grade do RCM, a simulação propriamente dita e o pós-processamento dos resultados.

Na pesquisa foi utilizado um período de 20 anos (1988-2007) para a climatologia do modelo ou período de referência; para o período futuro foram utilizadas séries de previsões climáticas para um período de 20 anos (2011-2030), considerando o cenário de emissão de gases de efeito estufa A1B, geradas a partir do aninhamento do GCM e do RCM. Considerou-se que um período de 20 anos é suficientemente extenso para filtrar qualquer variação interanual e suficientemente curto para indicar tendências climáticas na área de estudo. Para a avaliação da metodologia proposta poderia ter sido utilizado qualquer um dos cenários disponíveis de emissão de gases de efeito estufa. Optou-se pelo cenário A1B em função da disponibilidade de dados e pelo fato de ser esse o cenário utilizado em diversos dos estudos mencionados no capítulo 3.

##### **4.3.1.1 Modelo global utilizado para fornecer as condições de contorno do modelo regional**

Dentre os diferentes GCM existentes, optou-se pelo modelo HadCM3, desenvolvido pelo *Hadley Centre for Climate Prediction and Research*, que estabeleceu os cenários climáticos atuais e futuros em escala global, utilizados pelo IPCC para realização do TAR sobre mudanças climáticas; além disso, considerou-se a facilidade de acesso aos dados dos

cenários. A partir dos cenários gerados, tomaram-se os dados correspondentes ao cenário futuro A1B para os anos 2011-2030; o modelo HadCM3 tem uma resolução espacial de 2,5 x 3,75° (latitude-longitude), gerando uma rede global de células de 96 x 73 grelhas, equivalente a uma resolução de aproximadamente 417 x 278 km na latitude do Equador, o que reduz a 295 x 278 km a 45° de latitude.

Como foi descrito na revisão bibliográfica o modelo HadCM3 não precisa de ajustes nos fluxos de energia para gerar boas simulações; além disso, o modelo tem sido utilizado para simular 1.000 anos ou mais e não se observaram derivas ou *drifts* (GORDON *et al.*, 2000; COLLINS *et al.*, 2001).

Os dados gerados pelo modelo HadCM3 foram fornecidos pelo *Hadley Centre for Climate Prediction and Research* em quatro simulações diárias (0, 6, 12 e 18 horas UTC), com resoluções espaciais de 2,5° de latitude e longitude, e resolução temporal de 6 horas, com horizonte de 120 anos (1980-2100).

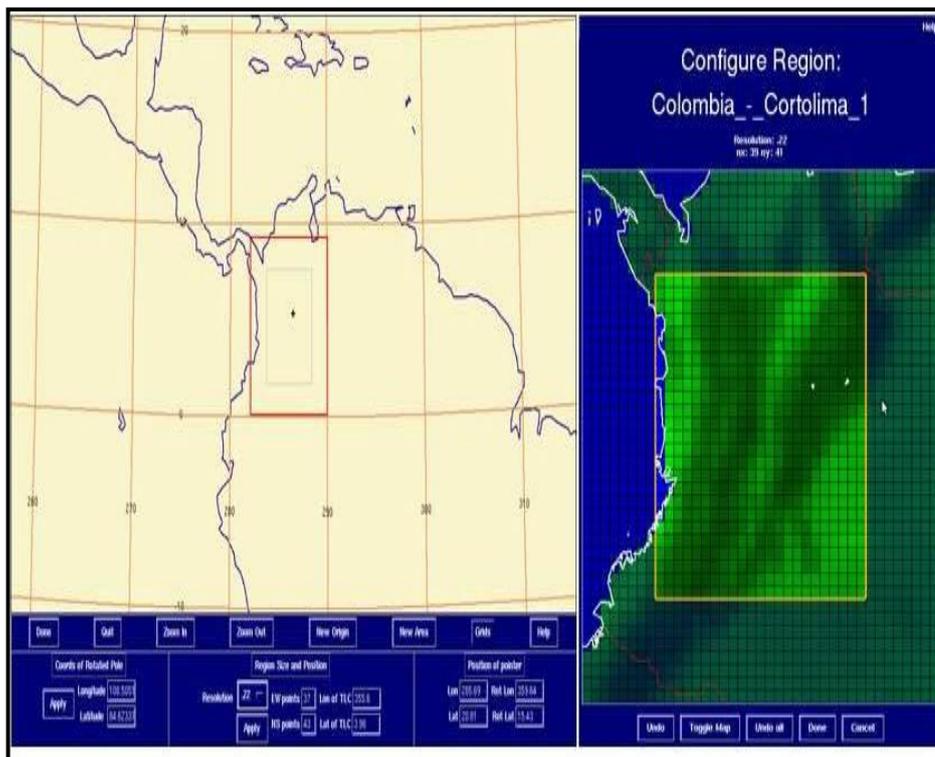
#### 4.3.1.2. Modelo de circulação regional utilizado para a regionalização (*downscaling*)

Dentre as principais vantagens de se utilizar um RCM destaca-se a possibilidade de obtenção de uma simulação mais realista do clima atual, devido à sua alta resolução, que permite estimativas mais detalhadas da mudança do clima, e melhor simulação e previsão de eventos extremos climáticos.

Na técnica de *downscaling* foram usadas as previsões climáticas do modelo HadCM3 para o cenário A1B como condições de contorno do modelo PRECIS, desenvolvido pelo *Hadley Centre for Climate Prediction and Research*, e que pode ser executado em qualquer local do mundo (JONES *et al.*, 2004). O modelo PRECIS tem alta resolução horizontal, de 0,44° (aproximadamente 50 x 50 km<sup>2</sup>) e 0,22° (aproximadamente 25 x 25 km<sup>2</sup>), cobre qualquer área do mundo com limite de 5.000 x 5.000 km e possui 19 níveis da atmosfera. Em relação a recursos computacionais, pode ser executado a um custo razoável sobre um domínio que considere uma parte da Colômbia. Um RCM usa como condições de contorno laterais e iniciais as saídas de um GCM; as saídas do RCM são previsões climáticas de resoluções maiores do que as geradas pelos GCM, para cenários atuais e futuros, e são usadas como entrada do modelo hidrológico, depois da correção dos erros baseados na dependência entre os dados de chuva observados e os valores previstos.

Optou-se pelo modelo PRECIS, pois: trata-se de um modelo derivado de GCM de terceira geração do referido centro de pesquisa; apresenta um sistema de modelagem amigável por meio de uma interface gráfica onde o usuário pode integrá-lo ou rodá-lo sobre qualquer área do mundo, em um computador pessoal potente, a custos relativamente baixos e pode obter informação climática regional útil para elaboração de trabalhos relacionados à simulação de sistemas climáticos e avaliação de impactos de mudanças climáticas em nível regional ou local; e o *software* é gratuito.

O primeiro passo executado nesta etapa é a definição da grade (tipo de projeção, localização, número de pontos e espaçamentos) para que sejam regionalizados ou interpolados os campos estáticos que descreverão o domínio. Na Figura 4.7 são apresentadas as características do domínio e da grade utilizada pelo modelo PRECIS; as principais características da grade utilizada neste trabalho são apresentadas na Tabela 4.7.



**Figura 4.7** – Mapa da Colômbia destacando o domínio e a grade do modelo PRECIS

**Tabela 4.7** – Características da grade utilizada nas simulações com o modelo PRECIS

Projeção	Lambert Conformal
Latitude do ponto central	4,84
Longitude do ponto central	-75,01
Pontos em X	39
Pontos em Y	41
Espaçamento dos pontos	25 km
Níveis na vertical	19

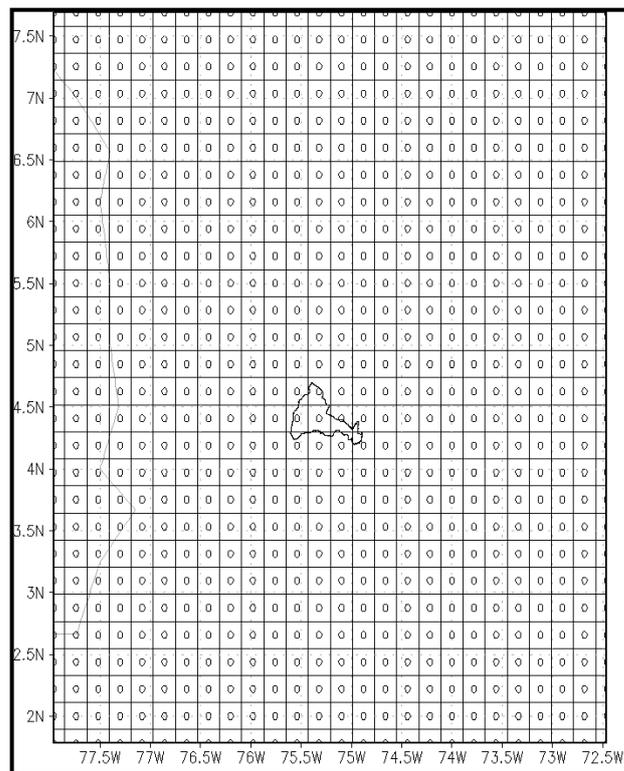
A resolução horizontal utilizada na presente pesquisa foi a mínima possível para as atuais condições e é a mesma utilizada por Cullen (1993) para a América do Sul,  $0,2^\circ \times 0,2^\circ$ , aproximadamente 25 km, com 19 níveis na vertical. Leduc & Laprise (2009) argumentam que o tamanho do domínio é um parâmetro que pode afetar consideravelmente a solução numérica dos RCM. Jones *et al.* (1995) mostraram que o domínio de um modelo regional deve ser suficientemente grande para permitir o pleno desenvolvimento dos elementos de pequena escala sobre a área de interesse; além disso, conclui-se que em domínios muito grandes a circulação principal e a variabilidade diária no RCM divergem daquelas do GCM na escala sinótica e em nível de domínios menores.

Na escala de ponto de grade o RCM gera livremente suas próprias características; Seth & Giorgi (1998) mostraram que as fronteiras laterais (domínio) devem ser colocadas bem fora da região de interesse a fim de evitar respostas irrealistas dos RCM. Giorgi & Mearns (1999) ressaltam que na escolha do domínio para qualquer RCM é desejável selecionar um domínio suficientemente grande para que o modelo possa desenvolver sua própria circulação interna na escala regional, mas que não seja demasiadamente grande a ponto de o clima do RCM desviar significativamente do GCM no centro do domínio.

Na presente pesquisa o domínio foi escolhido a fim de evitar a proximidade com as condições de fronteira da região de interesse com a área continental e visando englobar os sistemas atmosféricos atuantes na América do Sul. Na Figura 4.8 são apresentados o domínio, a grade e a resolução horizontal utilizados neste trabalho. De acordo com Jones *et al.* (1997) *apud* Alves (2007), para capturar 75% da variância do sinal verdadeiro, é desejável uma simulação com no mínimo 30 anos; além disso, esses autores mostraram que, com 20-30 anos de simulação, mudanças estatisticamente significativas nos extremos de precipitação poderiam ser obtidas. Para a presente pesquisa foram adotados períodos de simulação de 20 anos, tanto para o clima de referência (1988-2007), quanto para o clima futuro (2011-2030).

Segundo Jones *et al.* (2004), é possível converter os valores de saída do modelo PRECIS em formatos compatíveis com outros pacotes ou *softwares* (PP, GRIB ou NetCDF). Com a finalidade de ser eficiente no processo de armazenamento dos dados, devido ao grande volume dos resultados do modelo PRECIS, decidiu-se configurar o sistema com saídas no formato PP, que é um formato específico do *Hadley Centre for Climate Prediction and Research*; além disso, esse formato ocupa menor espaço em disco quando comparado com os demais. Nesse sentido, após o *downscaling*, foi desenvolvido um programa ou *script* em

pacote GrADS para transformar as variáveis do formato PP para o formato ASCII. No Anexo 1 é apresentado o *script* desenvolvido para esse fim.



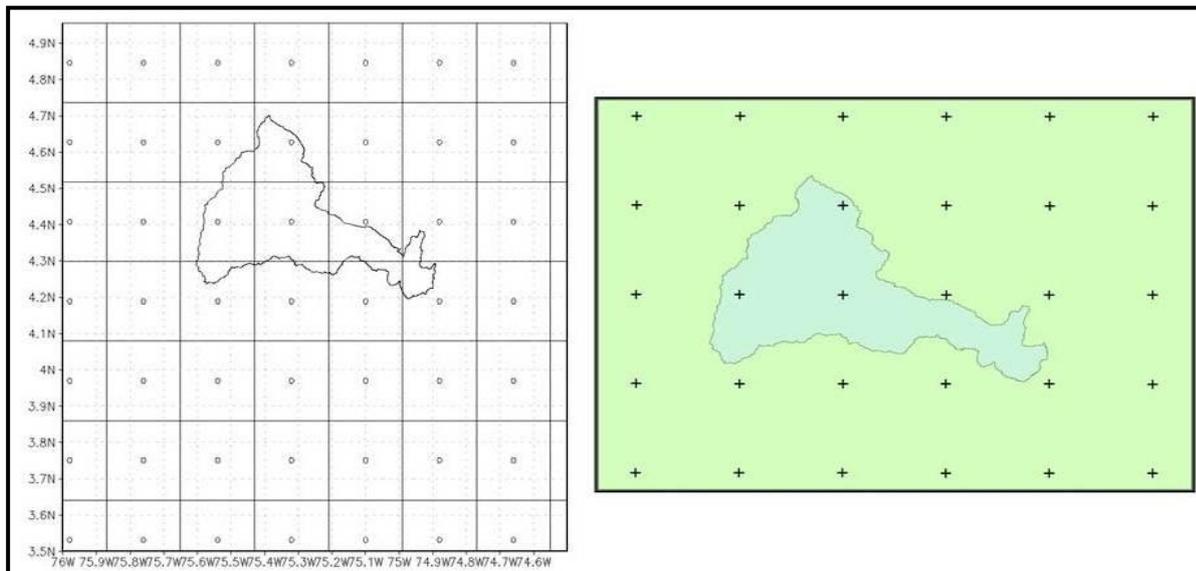
**Figura 4.8** – Grade, domínio e resolução estabelecida sobre a área de trabalho nas simulações com o modelo PRECIS

A área selecionada para integração do modelo PRECIS corresponde à região entre 3° 44' N a 5° 4' N de latitude e 75° 59' W a 74° 07' W de longitude, conforme pode ser visto na Figura 4.9. Os valores de previsão climática quantitativa (precipitação, temperatura etc.) com resolução de 25 km, disponíveis nos pontos de grade do modelo regional (Figura 4.9), são interpolados para a localização de cada posto pluviométrico a partir do *script* desenvolvido para tal fim (Anexo 2). O processo de interpolação, ilustrado na Figura 4.10, é realizado por meio da atribuição de pesos aos valores das variáveis climáticas de cada ponto da grade a interpolar (Figura 4.9), sendo o valor da variável (V) para um ponto de coordenadas (x, y) dado pela equação a seguir:

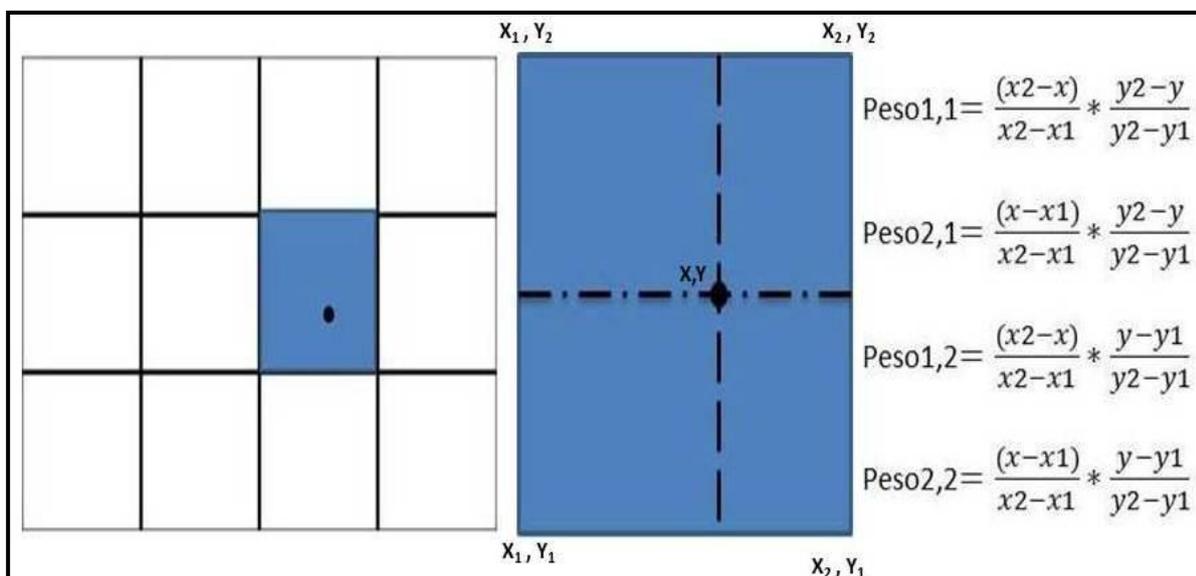
$$V = peso_{1,1} * V_{1,1} + peso_{1,2} * V_{1,2} + peso_{2,1} * V_{2,1} + peso_{2,2} * V_{2,2} \quad (4.1)$$

Em que:

V = valor da variável climática a interpolar nos pontos de grade do modelo; os pesos são calculados segundo explicitado na Figura 4.10.



**Figura 4.9** – Pontos da grade com previsão do modelo PRECIS para a BHRC, com espaçamento de 25 km



**Figura 4.10** – Esquema de interpolação das variáveis climáticas a partir dos pontos da grade com previsão do modelo PRECIS

#### 4.3.1.3 Validação do modelo de circulação regional

Antes de iniciar a discussão dos resultados obtidos com as integrações do RCM sobre a BHRC para o clima futuro, considerando cenários de concentração extrema de CO<sub>2</sub>, é importante descrever como esse tipo de modelo – no presente caso, o modelo PRECIS – simula o clima presente, a fim de analisar melhor seu desempenho para o clima do futuro.

As variáveis escolhidas para a validação do modelo PRECIS são aquelas que alimentam o modelo de simulação hidrológica, a saber: temperatura do ar e precipitação. Para validação das simulações do modelo PRECIS e a caracterização dos principais padrões atmosféricos dominantes sobre a BHRC, foram utilizados resultados mensais de precipitação e

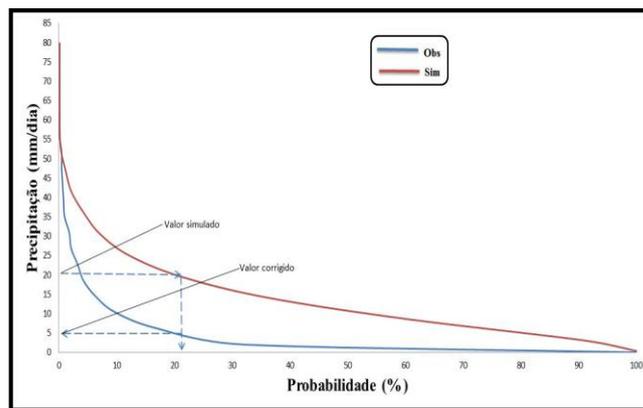
temperatura provenientes de três reanálises: do modelo NCEP/NCAR, com resolução horizontal de 2,5° latitude x 2,5° longitude; do modelo ERA40, com resolução horizontal de 0,5° x 0,5°; e do modelo HadCM3, com resolução de 2,5° x 3,75°. Esses dados, para o mesmo período (1988-2007) citado na metodologia, são utilizados como condições de contorno do modelo PRECIS para gerar saídas a uma resolução de 25 x 25 km<sup>2</sup>, com a finalidade de avaliar como o modelo regional representa o clima presente na bacia hidrográfica. Neste trabalho, os dados de reanálise dos modelos NCEP/NCAR, ERA40 e HadCM3 foram utilizados para avaliar como o modelo PRECIS representa a climatologia local nas diferentes escalas de tempo (anual e interanual).

Para Kistler *et al.* (2001), os valores da reanálise do modelo NCEP/NCAR são as saídas da assimilação global de dados. As correções dos erros de processamento resultaram em mudanças para alguns campos e no sistema de assimilação. Por isso, os valores de reanálise são livres de inconsistências e muito úteis em estudos climáticos como o proposto.

Foram analisados campos médios climatológicos de precipitação e temperatura da reanálise dos modelos NCEP/NCAR e ERA40, e do modelo HadCM3 reproduzido pelo PRECIS, comparando-os com os valores observados; essa avaliação teve por objetivo analisar a capacidade do modelo PRECIS em reproduzir os principais padrões do clima da BHRC. Além disso, foram obtidos mapas dos erros médios de precipitação e de temperatura, isto é, a diferença dos campos médios das variáveis precipitação e temperatura em relação aos seus valores médios climatológicos observados. Esse cálculo tem por objetivo avaliar e identificar os erros sistemáticos do modelo nos campos médios das variáveis representadas pelo RCM. Outro aspecto analisado foi o ciclo anual da precipitação e temperatura sobre a BHRC. Essa análise foi feita de acordo com a metodologia proposta por Alves (2007) e citada na revisão bibliográfica, na qual as saídas de um modelo climático regional são validadas por meio de estatísticas como viés (diferença entre os dados simulados e observados), coeficiente de correlação e erro quadrático médio.

Foram comparados os valores de precipitação observados e os resultados obtidos pelo *downscaling* do modelo PRECIS no período 1988-2007. Os RCM normalmente superestimam ou subestimam os valores de precipitação; a diferença entre os valores observados e os simulados (pelo modelo climático regional) denomina-se erro sistemático; e para utilizar a chuva prevista como entrada do modelo hidrológico é necessário minimizar os erros sistemáticos. Isso foi feito utilizando-se a transformação da curva de distribuição de probabilidades de precipitação, conforme mencionado no item 3.5.

Foram construídas curvas empíricas de distribuição de probabilidades com as séries diárias de precipitações geradas pelo modelo regional (1988 a 2007) e os respectivos valores observados. As curvas foram construídas para cada mês do ano (janeiro a dezembro) e para cada posto pluviométrico (ponto da grade) sobre a BHRC. A cada um dos valores diários de precipitação prevista pelo modelo PRECIS é associada uma probabilidade. O valor de precipitação corrigido associado a essa probabilidade é posteriormente identificado sobre a curva de distribuição de probabilidade das precipitações observadas. Finalmente, são ajustados os valores em cada ponto da grade para corrigir os erros sistemáticos da precipitação gerada pelo RCM. Na Figura 4.11 ilustra-se esse procedimento.



**Figura 4.11** – Correção de erros sistemáticos dos valores de precipitação prevista diária com base nas curvas de distribuição de probabilidades acumuladas dos valores observados e previstos pelo modelo PRECIS

### 4.3.2 Modelo de simulação hidrológica

A avaliação dos efeitos das potenciais mudanças climáticas nas vazões e na hidrologia das bacias hidrográficas é cada vez mais importante de ser realizada para uma boa gestão dos recursos hídricos. Uma estimativa realista das mudanças na disponibilidade hídrica é realizada por meio de avaliações hidrológicas regionais mediante o uso de modelos de simulação hidrológica, que incorporam a complexidade da topografia, das características dos solos, da variabilidade hidrológica, da cobertura e uso do solo e de mudanças climáticas futuras, dentre outras.

Na presente pesquisa foi utilizado o modelo SWAT devido às seguintes características: disponibilidade dos dados de entrada do modelo; o modelo é computacionalmente eficiente e capaz de simular um alto nível de detalhes espaciais, permitindo subdividir a bacia em áreas contendo combinações únicas; o modelo possibilita estimar diferenças na evapotranspiração e outras condições hidrológicas para diferentes usos do solo; cada sub-bacia pode ser parametrizada usando uma série de HRU, com o escoamento sendo calculado

para cada uma delas e propagado para obtenção do escoamento total para a sub-bacia, o que pode aumentar a precisão das previsões e fornecer melhor descrição física do balanço de água na bacia; o modelo dispõe de flexibilidade e de familiaridade com um SIG a ele integrado; é possível prever os impactos das alterações climáticas e das ações humanas no balanço hidrológico; e o modelo é de domínio público. A vantagem adicional desse modelo é que, por ser distribuído, é incorporada a variabilidade espacial da chuva, tirando máximo proveito da informação fornecida por modelos como o modelo PRECIS, que fornece um valor de chuva para cada quadrícula de 0,2 x 0,2°, em cada intervalo de tempo. Ressalta-se que, conforme mencionado no item 3.3, o modelo SWAT tem sido amplamente usado e validado em nível mundial.

Nas estimativas do escoamento é utilizado o método do Número de Curva do SCS; além disso, para a estimativa da evapotranspiração o modelo SWAT fornece três métodos de cálculo: Penman-Monteith, Priestley-Taylor e Hargreaves (NEITSCH *et al.*, 2005). O uso do método Penman-Monteith requer dados de radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento, enquanto que para o uso do método Priestley-Taylor são necessários dados de radiação solar, temperatura do ar e umidade relativa.

No âmbito desta pesquisa optou-se pelo método Hargreaves, pois o mesmo apresenta facilidade de uso por necessitar apenas de informações de temperatura do ar (temperatura máxima, mínima e média) para o cálculo da evapotranspiração potencial. O método é baseado na seguinte equação:

$$\lambda ETP = 0,0023H_o(T_{máx} - T_{mín})^{0,5}(T_{méd} + 17,8) \quad (4.2)$$

Em que:

$\lambda$  = calor latente ( $J\ kg^{-1}$ );

ETP = evapotranspiração potencial (mm);

$H_o$  = radiação extraterrestre ( $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ );

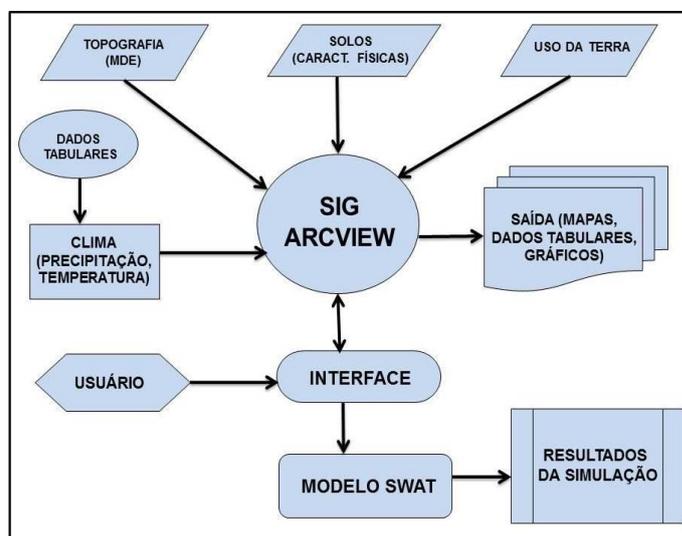
$T_{máx}$  = temperatura máxima diária ( $^{\circ}C$ );

$T_{mín}$  = temperatura mínima diária ( $^{\circ}C$ );

$T_{méd}$  = temperatura média diária ( $^{\circ}C$ ), obtida como a média aritmética entre as temperaturas mínima diária e máxima diária.

A aplicação do modelo SWAT contempla a divisão da BHRC, a definição dos parâmetros do modelo para o caso em estudo, a execução das etapas de calibração e validação – com base em valores observados de vazões –, e a realização da etapa de simulação de vazões. O uso do modelo SWAT requer uma grande quantidade de parâmetros de entrada que estão relacionados com as características físicas da bacia. O levantamento experimental das informações necessárias demanda uma grande quantidade de tempo e pode ter custo elevado. Assim, para a definição dos valores desses parâmetros, é possível utilizar valores obtidos a partir de trabalhos anteriores.

É necessário dispor de um Modelo Digital de Elevação (MDE), plano e informação alfanumérica de solos, e plano do uso da terra; toda essa informação é chamada Plano de Informação. Di Luzio *et al.* (2002) desenvolveram uma extensão e uma interface gráfica entre o modelo SWAT e o SIG *ArcGis*, com as quais são obtidas importantes componentes funcionais e capacidades do SIG *ArcGis* para subdividir automaticamente a bacia em sub-bacias; além disso, incorpora-se uma ferramenta para a definição das HRU na bacia hidrográfica. A interface permite que as saídas do modelo sejam exibidas, utilizando-se mapas, gráficos e tabelas do SIG *ArcGis*. Uma apresentação do método e dos procedimentos pode ser vista na Figura 4.12.



**Figura 4.12** – Procedimento para geração da base de dados e simulação do modelo SWAT via SIG (Fonte: MACHADO, 2002)

Para o desenvolvimento deste trabalho, os parâmetros requeridos pelo modelo SWAT foram divididos em parâmetros de uso e ocupação do solo, de solos e climáticos. O primeiro passo para o funcionamento do modelo SWAT ocorre na geração dos planos de informação

cartográficos, que são realizados no SIG *ArcGis*, e dos dados alfanuméricos de clima, os quais são descritos na continuação.

#### 4.3.2.1 Geração do Modelo Digital de Elevação (MDE)

O MDE, representação matemática tridimensional de uma bacia hidrográfica (por meio da representação de coordenadas X, Y e Z), pode ser obtido a partir do SIG *ArcGis*. O MDE tem como finalidade recalcular a rede hídrica da bacia hidrográfica; para obtenção do MDE da BHRC, as curvas de nível foram digitalizadas das cartas topográficas na escala de 1:25.000, espaçadas de 20 em 20 m, com o uso do *software* ArcInfo v. 9.2, tendo o arquivo sido exportado para o formato *shape* (.shp). As curvas de nível nesse formato foram interpoladas utilizando a extensão 3D Analyst do *software* ArcInfo v. 9.2 e o modelo de interpolação *Triangular Irregular Network*. O resultado da interpolação foi convertido para o formato *raster* com resolução de 30 m, formando assim uma matriz de células sobre a bacia hidrográfica. A digitalização foi feita com base no sistema de coordenadas do Sistema Universal Transverso de Mercator (UTM) Colômbia Bogotá Zone.

#### 4.3.2.2 Geração do mapa de uso e ocupação do solo

Para elaboração do mapa de uso e ocupação do solo, seguiu-se a metodologia proposta por Machado (2002). O plano de uso e ocupação do solo foi obtido a partir da retificação e da classificação das duas imagens do satélite SPOT (códigos identificadores 5645341030108153300-1J e 5644341030108153302-2J, de 8 de janeiro de 2003). Assim, os *pixels* dessas imagens foram reorganizados em relação a um determinado sistema de projeção cartográfica por meio da reformatação da cena em uma base cartográfica. Nesse processo, foram utilizadas cartas-base na escala de 1:25.000, estabelecendo-se pontos de controle terrestre facilmente localizados nas cartas e na cena a ser retificada. Desse modo, criou-se um arquivo de correspondência no *software* Erdas Imagine v.8.4 e foi feito um ajuste linear da superfície pelo método do vizinho mais próximo a esse *software*, obtendo-se a imagem georreferenciada, convertida no sistema de coordenadas UTM Colômbia Bogotá Zone. Nessa imagem georreferenciada foi criada uma composição falsa cor RGB – R (Red – B2), G (Green – B3) e B (Blue – B4).

Após ter sido georreferenciada, a imagem foi classificada no Erdas Imagine utilizando-se a classificação supervisionada, que é um procedimento baseado em análises quantitativas, cabendo ao usuário selecionar áreas de treinamento pertencentes às classes desejadas e treinar o analisador de imagens para localizar todos os demais *pixels* pertencentes às classes

anteriormente definidas, com base em algumas regras estatísticas pré-estabelecidas (VALÉRIO FILHO, 1994 *apud* MACHADO, 2002).

As amostras de treinamento foram coletadas para 22 subclasses de uso e ocupação do solo (de acordo com a metodologia *Corin Land Cover*, adaptada para a Colômbia na escala 1:25000 pelo IGAC), representadas em quatro classes: 1) territórios artificializados; 2) territórios agrícolas; 3) bosques e áreas seminaturais; e 4) superfícies de água. As áreas urbanas foram excluídas da classificação com o objetivo de aumentar o desempenho do classificador, pois apresentaram respostas espectrais similares às emitidas pelas áreas agrícolas. Os limites das áreas urbanas foram incorporados digitalizando a informação de cartas planialtimétricas do Plano Cartográfico do Departamento de Tolima, do IGAC, escala 1:25.000; posteriormente, os polígonos resultantes foram vetorizados, por meio do módulo vetor de *Erdas Imagine*, com a finalidade de serem utilizados no *software ArcGis v. 9.2*.

Foi realizada uma avaliação da exatidão do mapeamento por meio da geração de pontos aleatórios no mapa, que foram verificados no campo, com o auxílio de fotografias aéreas e de um *Global Positioning System*, e comparados com a imagem classificada. Finalmente, o mapa de uso e cobertura do solo foi transformado em dados *raster*, com a mesma resolução do MDE.

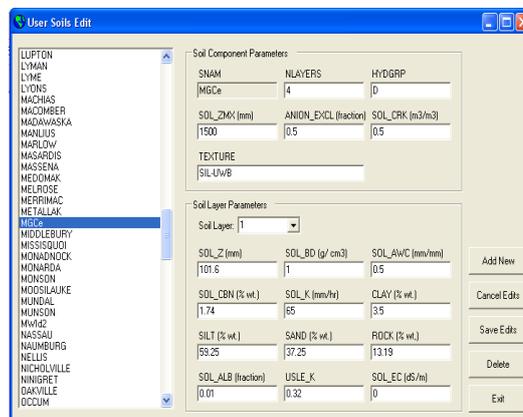
#### 4.3.2.3 Geração do mapa de solos

O mapa de solos necessário para realizar as simulações com o modelo SWAT foi gerado por meio da digitalização e união das 19 cartas pedológicas disponíveis em IGAC (1997) no *software Arcinfo v. 9.2*, na escala 1:25.000. Como resultado, foram obtidas 26 classes de solo para toda a bacia; o mapa pedológico foi reclassificado, gerando-se um arquivo no formato vetorial, que foi transformado para o formato *raster* com resolução de 30 m. Os dados tabulares de solos requeridos pelo modelo SWAT são divididos em parâmetros do tipo de solo e parâmetros da camada do solo.

Para o banco de dados de solo, foi necessário adicionar as características físicas dos solos (Anexo 3) da bacia exigidas pelo modelo SWAT, que são relacionados aos seguintes parâmetros: nome do solo (SNAM); número de camadas (NLAYERS); grupo hidrológico do solo (HYDGRP); profundidade total (SOL\_ZMX); em mm, porosidade do solo (ANION\_EXCL); profundidade da camada (SOL\_Z); em mm, massa específica do solo (SOL\_BD), em g/cm<sup>3</sup>; capacidade de água disponível na camada (SOL\_AWC), em mm de água/mm de solo; carbono orgânico (SOL\_CBN), em % peso solo; condutividade hidráulica

saturada da camada (SOL\_K), em mm/h; porcentagem de argila (CLAY), em %peso solo; porcentagem de silte (SILT), em %peso solo, porcentagem de areia (SAND), em %peso solo; porcentagem de pedregulho (ROCK), em %peso solo; albedo do solo (SOL\_ALB) e fator de erodibilidade da camada (USLE\_K), em  $(\text{ton m}^2 \text{ h/m}^3 \text{ ton cm})$ .

A maioria dos dados utilizados neste estudo teve como fonte o levantamento geral de solos para o Departamento de Tolima, realizado por IGAC (1997). Os dados não retirados desse levantamento (grupo hidrológico, quantidade de água disponível na camada de solo, matéria orgânica, condutividade hidráulica, densidade aparente e fator de erodibilidade do solo) foram calculados ou obtidos de estudos não publicados realizados pelo Centro Internacional de Agricultura Tropical. A informação de solo é digitada diretamente no banco de dados do modelo SWAT, em cada classe de solo e para cada horizonte (Figura 4.13).



**Figura 4.13** – Janela na qual são inseridos os dados de solo requeridos pelo modelo SWAT, para cada classe de solo e em cada horizonte

#### 4.3.2.4 Parâmetros climáticos e hidrológicos

O modelo SWAT possui, no seu banco interno de dados, informações de estações meteorológicas dos Estados Unidos da América, com valores que diferem totalmente do que é observado para a área de estudo. Assim, foi necessário entrar com dados diários e médios anuais de estações climatológicas, pluviométricas e fluviométricas instaladas na BHRC.

Os dados climáticos necessários para entrada no modelo SWAT foram cedidos pelo *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)* da Colômbia, para as estações meteorológicas cuja distribuição espacial é indicada na Figura 4.14, com dados georreferenciados apresentados na Tabela 4.8. Os dados de precipitação e de vazão também foram obtidos do IDEAM. Utilizaram-se dados das 23 estações pluviométricas, que possuem a mesma série temporal, indicadas na distribuição espacial da Figura 4.15, com dados georreferenciados apresentados na Tabela 4.9.

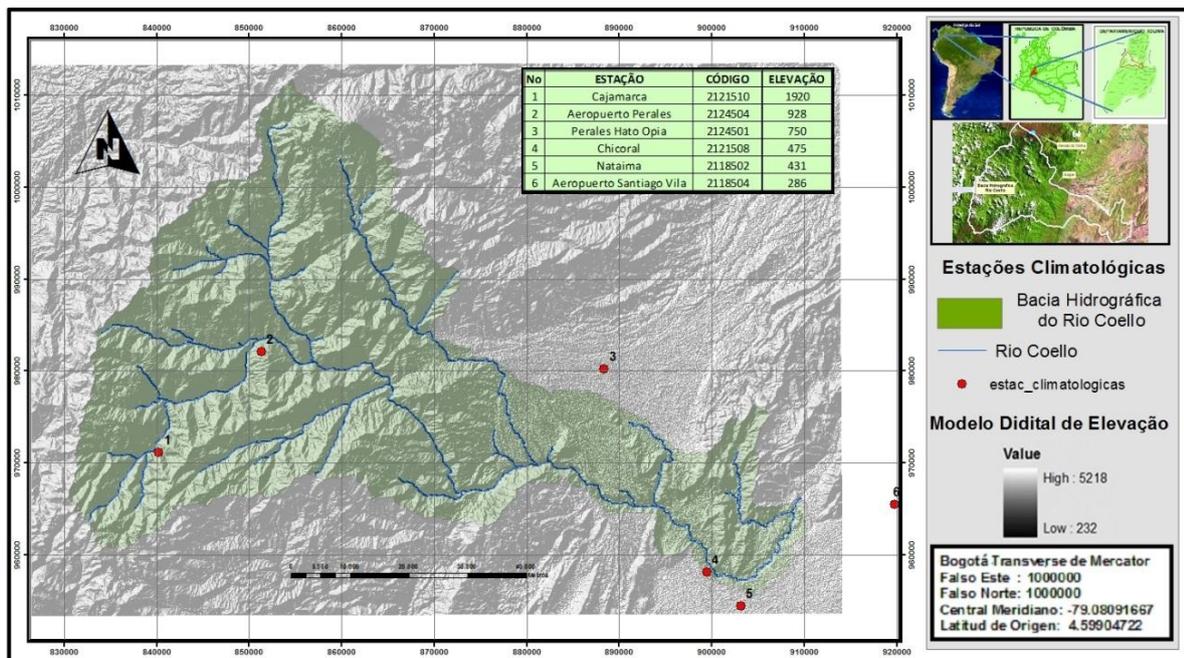


Figura 4.14 – Localização e distribuição das estações climatológicas na BHRC

Tabela 4.8 – Estações de dados climatológicos

Estação	Código	Elevação (m)	XPR (m)	YPR (m)
Cajamarca	2121510	1920	850477.3	983028.6
Aeropuerto Perales	2124504	928	881133.4	981718.9
Perales Hato Opia	2124501	750	887897.6	980943.8
Chicoral	2121508	475	898125.9	959719.8
Nataima	2118502	431	902073.2	954872.4
Aeropuerto Santiago Vila	2118504	286	919793.2	965436.6

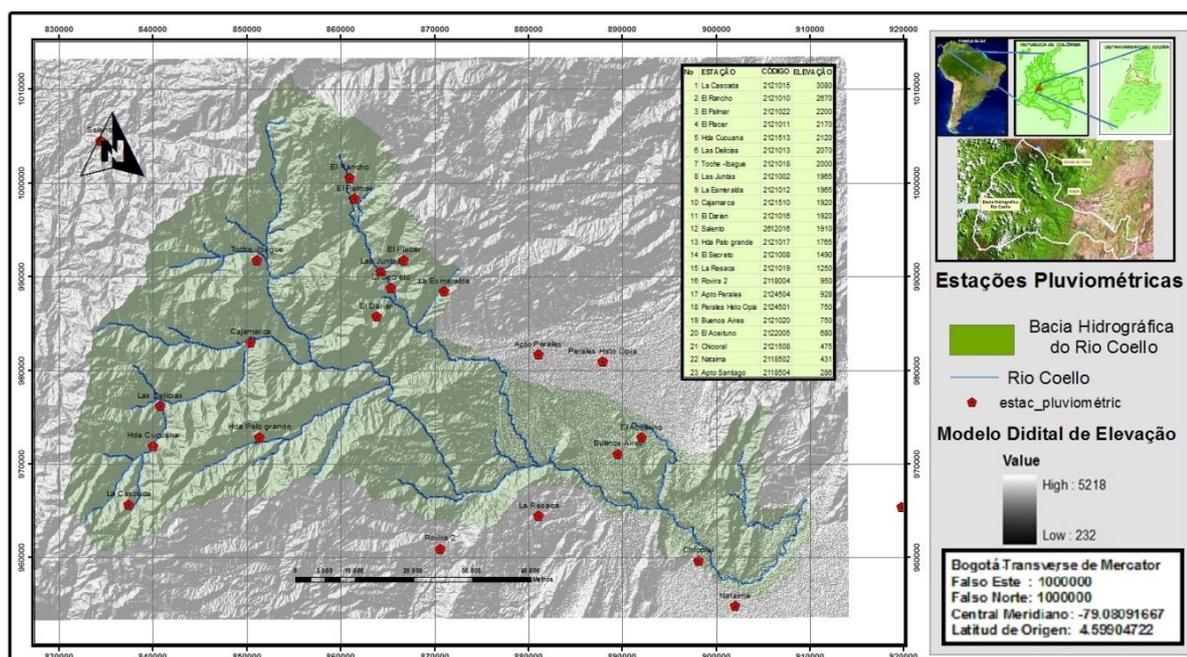


Figura 4.15 – Localização e distribuição das estações pluviométricas na BHRC

**Tabela 4.9 – Estações pluviométricas, códigos oficiais, elevações e coordenadas UTM**

<b>Estação</b>	<b>Código</b>	<b>Elevação (m)</b>	<b>XPR (m)</b>	<b>YPR (m)</b>
La Cascada	2121015	3080	837786.8	965395.8
El Rancho	2121010	2670	861331.9	1000260.0
El Palmar	2121022	2200	862851.1	996540.8
El Placer	2121011	2170	861858.4	998025.8
Hacienda Cucuana	2121513	2120	840395.9	971656.1
Las Delicias	2121013	2070	841215.3	975928.6
Toche – Ibagué	2121018	2000	851517.2	991512.1
Las Juntas	2121002	1965	864650.9	990241.6
La Esmeralda	2121012	1965	871415.9	988144.4
Cajamarca	2121510	1920	850475.4	983028.6
El Darién	2121016	1920	864211.3	985473.9
Salento	2612016	1910	834497.4	1004553.0
Hacienda Palo Grande	2121017	1765	851711.3	972590.9
El Secreto	2121008	1490	865795.3	988549.9
Resaca	2121019	1250	881483.3	964193.2
Rovira 2	2118004	950	871021.9	960675.1
Aeropuerto Perales	2124504	928	881135.2	981717.8
Perales Hato Opia	2124501	750	887894.5	980934.1
Buenos Aires	2121020	750	889939.8	970817.8
El Aceituno	2122005	680	892421.5	972528.8
Chicoral	2121508	475	898125.9	954860.1
Nataima	2618502	431	902073.2	1004553.0
Aeropuerto Santiago Vila	2118504	286	919793.2	965436.6

A BHRC possui oito postos fluviométricos, cuja distribuição espacial é indicada na Figura 4.16, com dados georreferenciados apresentados na Tabela 4.10. Para a subdivisão das sub-bacias foram incluídas as coordenadas dessas estações, as quais possuem a mesma série temporal das estações pluviométricas e meteorológicas. As vazões do posto Payande foram usadas nas etapas de calibração e de validação do modelo SWAT.

As variáveis hidrológicas devem ter séries temporais coincidentes, pois o modelo SWAT correlaciona as estações por meio das tabelas com as coordenadas de localização e gera uma única tabela para cada variável hidrológica. O gerador climático do modelo SWAT (WXGEN) gera valores climáticos diários em duas situações: na ausência de algum valor ou quando se especifica que os valores serão gerados. Para o cálculo dos dados faltantes o arquivo de entrada do gerador climático do modelo SWAT deve conter dados médios mensais necessários para gerar dados climáticos diários para a área de estudo.

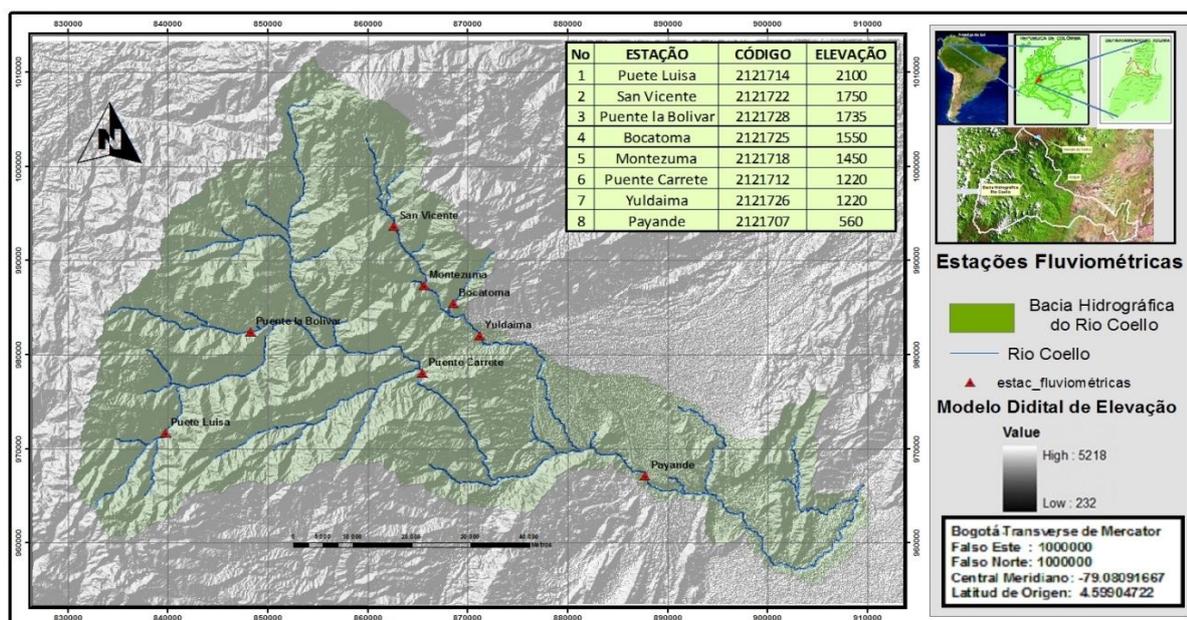


Figura 4.16 – Localização e distribuição dos postos fluviométricos na BHRC

Tabela 4.10 – Postos fluviométricos da BHRC

Posto fluviométrico	Código	Elevação (m)	XPR (m)	YPR (m)
Puente Luisa	2121714	2100	839808.5	971669.38
San Vicente	2121722	1750	862650.7	993595.9
Puente la Bolivar	2121728	1735	848338.4	982425.1
Bocatoma	2121725	1550	868606.0	985422.5
Montezuma	2121718	1450	865709.8	987344.3
Puente Carretera	2121712	1220	865523.1	978029.95
Yuldaima	2121726	1220	871227.7	982024.8
Payande	2121707	560	887800.0	967120.0

As simulações com o modelo SWAT requerem dados diários de precipitação (mm) e de dados climáticos para estimar a evapotranspiração. Como se optou pelo uso da equação de Hargreaves, foi necessário fornecer apenas valores de temperaturas diárias mínima e máxima do ar (°C), não sendo necessários valores de radiação solar incidente, velocidade do vento e umidade relativa do ar. Os parâmetros climáticos diários para toda a bacia são inseridos diretamente no banco de dados do mesmo (Figura 4.17).

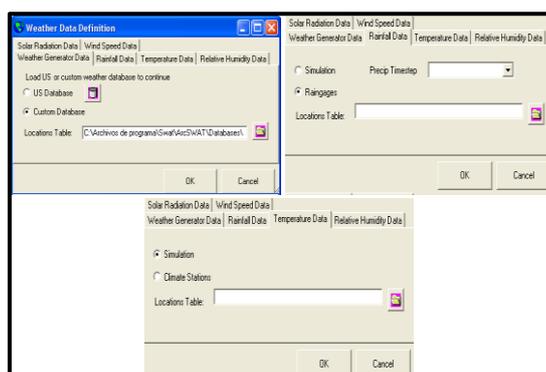


Figura 4.17 – Janelas para entrada de dados climáticos diários no modelo SWAT

#### 4.3.2.5 Análise de sensibilidade

Segundo Zhang *et al.* (2012), a análise de sensibilidade é realizada para determinar os fatores de entrada que têm o maior impacto sobre os resultados de saída do modelo e é uma ferramenta muito importante na criação, melhoria e calibração de modelos hidrológicos. Os parâmetros identificados como mais sensíveis são usados na calibração do modelo com a finalidade de extrair ao máximo os recursos fornecidos pelo modelo, gerando maior consistência dos dados gerados pelo modelo hidrológico.

Para determinar a importância dos parâmetros requeridos pelo modelo SWAT deve ser feita uma avaliação detalhada da sensibilidade do modelo. Esse processo pode ajudar a aquisição e refinamento dos dados de maior influência na resposta do modelo hidrológico. Além disso, é uma ferramenta muito importante para ajudar a identificar os parâmetros a serem calibrados, entender melhor a estrutura do modelo, reduzir incertezas e aumentar a confiabilidade dos resultados.

O modelo SWAT é sensível a mais de 100 parâmetros de entrada (ARNOLD *et al.*, 2000) relacionados à vegetação, ao manejo da terra, aos solos, ao clima, aos aquíferos, aos canais e aos reservatórios, sendo o CN2 (Número de Curva) o mais sensível. Ainda assim, para melhor eficiência na calibração dos parâmetros, uma análise de sensibilidade deve ser feita para determinar a importância relativa de cada um deles na resposta do modelo. Devido ao grande número de parâmetros de entrada, não é possível estudar a incerteza de todos eles. Também, a resposta do modelo não é igualmente sensível para todos os parâmetros.

Segundo Van Griensven *et al.* (2006), o método de análise de sensibilidade implantado no modelo SWAT é chamado *Latin Hypercube One-Factor-At-a-Time*. Esse método identifica os parâmetros que têm ou não têm influência significativa sobre as simulações realizadas pelo modelo a partir de observações em bacias hidrográficas específicas, permitindo que sejam feitas análises de sensibilidade mais robustas.

Na análise de sensibilidade, o modelo SWAT gera um arquivo que contém a posição dos parâmetros analisados e seu grau de sensibilidade; os valores da sensibilidade variam entre 1 (maior sensibilidade) e 28 (menor sensibilidade ou nenhuma sensibilidade).

A análise de sensibilidade será realizada para determinar a influência de um conjunto de parâmetros sobre as vazões da BHRC no ponto da estação Payande.

#### 4.3.2.6 Calibração e validação

A etapa de calibração de um modelo hidrológico é um procedimento utilizado para estabelecer um ou mais conjuntos de parâmetros adequados de entrada de forma a otimizar uma estatística de ajuste entre os dados previstos e os valores observados. Assim, a calibração de um modelo hidrológico implica na modificação dos valores de alguns parâmetros e na comparação das saídas de interesse previstas pelo modelo com os dados observados até que o valor mínimo de uma função objetivo é alcançado.

No processo de validação de um modelo hidrológico os parâmetros e valores obtidos no processo de calibração são utilizados e nenhum valor é ajustado durante a validação; quando os parâmetros e valores utilizados na validação não permitem alcançar a função objetivo, os parâmetros e valores utilizados na calibração podem ser mudados ou revisados.

Para Arnold *et al.* (2000), na calibração tradicional de um modelo hidrológico o primeiro passo é dividir a série temporal de valores de vazões observados em duas séries: uma para calibração e outra para validação; no período de calibração os valores dos parâmetros de entrada do modelo podem ser variados em toda a bacia até que um ajuste aceitável nas vazões na saída da bacia hidrográfica seja obtido. Em seguida, o modelo é rodado usando os mesmos parâmetros e valores de entrada do modelo na fase de validação e o ajuste é determinado. Ressalta-se que é comum considerar um período de aquecimento de um modelo hidrológico em função do desconhecimento das condições de umidade da bacia hidrográfica que está sendo simulada.

Na presente pesquisa as etapas de calibração e de validação do modelo SWAT foram realizadas da seguinte forma, sempre utilizando dados observados de precipitação e vazões:

- Para as simulações realizadas na BHRC, considera-se um período de dois anos (1988 e 1989) que antecederam os anos avaliados, com a finalidade de se obter resultados menos dependentes dos valores relacionados às condições iniciais;
- O modelo hidrológico é rodado manualmente, sendo o ajuste da calibração baseado em critérios quantitativos e/ou em um juízo visual da comparação de hidrogramas simulados e observados;
- O modelo hidrológico é calibrado mensalmente para o período 1990-1998, com a finalidade de garantir a variabilidade anual e estacional das vazões; e

- A validação do modelo é realizada para o período 1999-2007 em nível mensal.

O desempenho quantitativo do modelo SWAT foi avaliado com base nas seguintes funções objetivo: a) coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (COE), conforme a Equação 3.1; b) desvio das vazões (Dv%), conforme a Equação 3.2; e c) coeficiente de correlação ( $R^2$ ), conforme a Equação 3.3.

### **4.3.3 Previsões de vazão com base nos resultados climáticos do modelo PRECIS**

Conforme mencionado no item 4.3.1, o modelo PRECIS, aninhado com o GCM HadCM3, foi rodado para gerar valores diários de precipitação e temperatura com uma resolução espacial de 25 x 25 km para o período presente 1988-2007 (período de referência ou de base) e para o período futuro (2011-2030) considerando o cenário de emissão de gases de efeito estufa A1B. Os erros sistemáticos de precipitação foram corrigidos por meio do uso de curvas de distribuição de probabilidades com base nos dados observados para o período 1988-2007. Os valores diários de temperatura e aqueles corrigidos de precipitação são utilizados como dados de entrada do modelo SWAT para simular valores de evapotranspiração real e vazões tanto para o período de base, como para o período futuro.

Portanto, além dos dados observados de vazão para o período presente (1988-2007), foram obtidos valores de vazão para o mesmo período a partir do uso do modelo SWAT considerando: a) dados observados de precipitação e temperatura; e b) valores de precipitação (corrigidos) e temperatura gerados pelo modelo PRECIS.

### **4.3.4 Avaliação dos possíveis efeitos das mudanças climáticas nos recursos hídricos**

Para avaliar os possíveis efeitos de mudanças climáticas na BHRC foram comparadas as saídas do modelo SWAT das simulações realizadas para os períodos de base e futuro, sempre considerando como dados de entrada os valores gerados pelo modelo PRECIS de precipitação (corrigidos) e temperatura. Os componentes do balanço hídrico utilizados foram: vazão (incluindo a curva de permanência), temperatura média, evapotranspiração potencial (ETP) e evapotranspiração real (ET).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Previsões climáticas do modelo PRECIS

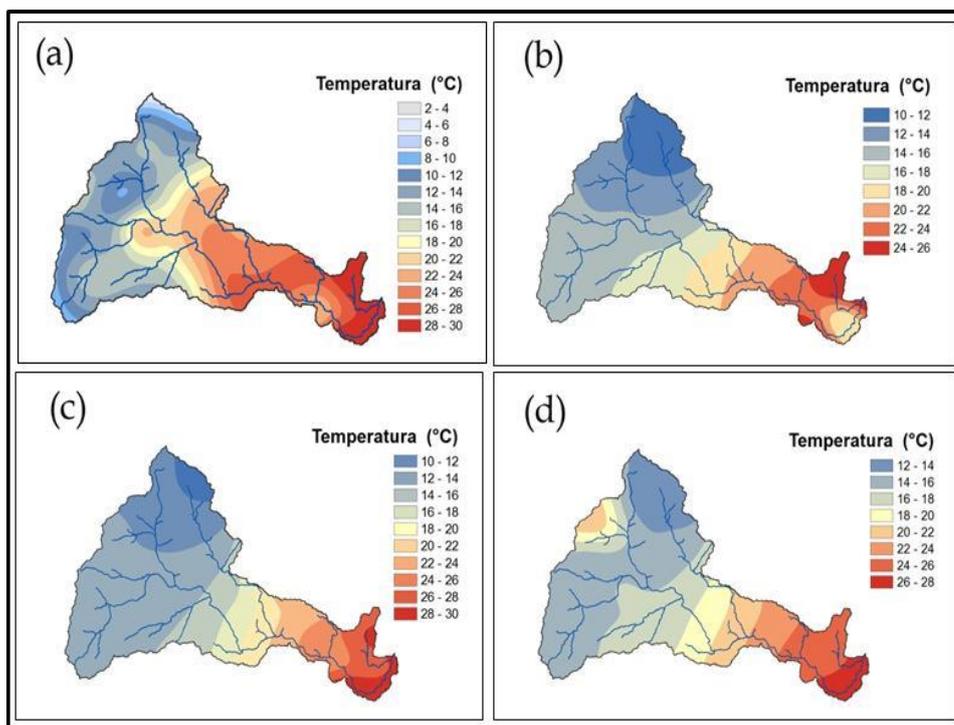
Conforme descrito no Capítulo 4, foram obtidas previsões do modelo PRECIS para a BHRC utilizando as condições de contorno disponibilizadas pelas previsões realizadas com o modelo regional. O modelo PRECIS forneceu previsões climáticas (precipitação e temperatura do ar entre outras) em uma grade com pontos distanciados de  $0,2^\circ$  em longitude e longitude, correspondendo a células de aproximadamente  $25 \times 25$  km.

Na validação dos dados gerados pelo modelo PRECIS foram analisados campos médios climatológicos da precipitação e temperatura do RCM (utilizando como condições de contorno NCAR/NCEP reanálises, ERA40 reanálises e HadCM3), comparando-os com os dados observados. Essa análise teve por objetivo verificar a capacidade do RCM em reproduzir os principais padrões do clima na BHRC.

#### 5.1.1. Previsões de temperatura

Na Figura 5.1 as distribuições espaciais das temperaturas médias multianuais do ar obtidas das simulações do modelo PRECIS para o período 1988-2007, utilizando como condições de contorno os valores provenientes das reanálises de ERA40 e de NCAR/NCEP e do modelo HadCM3, são comparadas com aquela gerada de dados observados para o mesmo período. Nota-se que as simulações com as três condições de contorno não representam adequadamente os detalhes nas partes altas e médias da BHRC, embora seja adequadamente retratado o padrão geral da temperatura, o que é confirmado pelos valores dos coeficientes de correlação obtidos (temperaturas observadas e simuladas pelos modelos) de 0,84 (ERA40), 0,85 (NCAR/NCEP) e 0,84 (HadCM3); os valores do erro quadrático médio são relativamente baixos, respectivamente iguais a  $1,94^\circ\text{C}$ ,  $1,56^\circ\text{C}$  e  $1,68^\circ\text{C}$ .

Os valores dos vieses – Tabelas 5.1 (ERA 40), 5.2 (NCAR/NCEP) e 5.3 (HadCM3), e Figura 5.2 – mostram que são geradas subestimativas generalizadas da temperatura pelo modelo PRECIS utilizando as condições de contorno ERA40 (de até  $5^\circ\text{C}$ ) e HadCM3 (de até  $3^\circ\text{C}$ ). Já com a condição de contorno NCAR/NCEP são geradas superestimativas na parte baixa e subestimativas nas partes média e alta da BHRC (viés negativo de até  $-0,02^\circ\text{C}$  na parte baixa e de até  $-3,75^\circ\text{C}$  na parte alta da bacia). Observa-se que o modelo PRECIS subestima a temperatura em toda a região, provavelmente devido ao fato de o modelo regional ainda ter uma orografia suavizada.



**Figura 5.1** – Distribuição espacial das temperaturas médias multianuais do ar para dados observados (a) e simulados com o modelo PRECIS, com condições de contorno ERA40 reanálises (b), NCAR/NCEP reanálises (c) e HadCM3 (d), para o período 1988-2007

**Tabela 5.1** – Viés da temperatura (°C) simulada pelo modelo PRECIS, utilizando como condição de contorno ERA40 reanálise, para o período 1988-2007

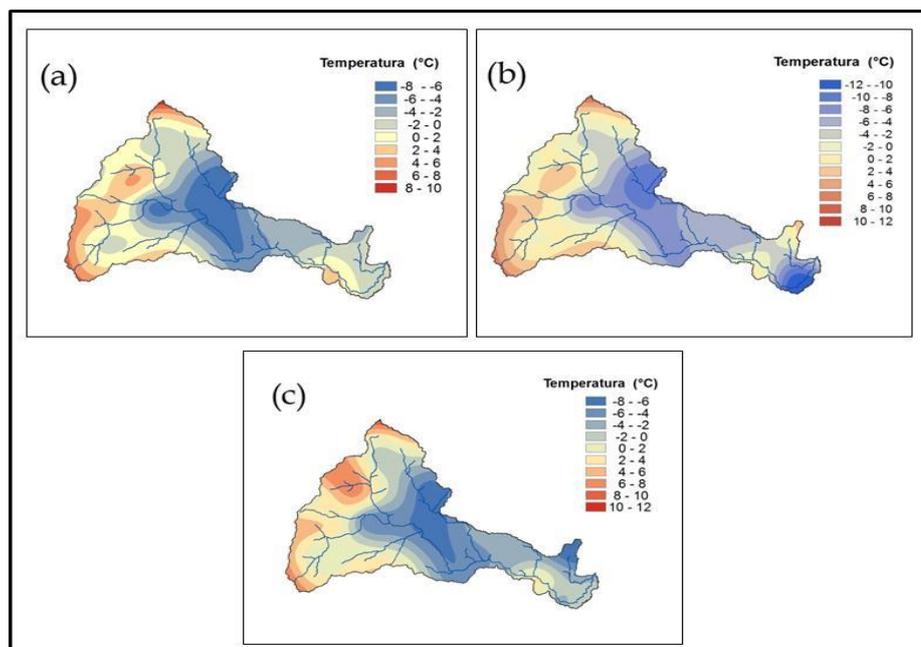
Estação	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Anual
Cajamarca	-4,41	-4,43	-4,29	-4,35	-3,71	-4,02	-4,23	-3,97	-3,82	-3,97	-4,24	-4,22	-4,14
Aeropuerto Perales	-4,48	-5,03	-4,64	-4,68	-4,65	-3,55	-5,11	-5,04	-4,86	-4,24	-3,98	-4,12	-4,53
Perales Hato Opia	-4,89	-5,04	-4,56	-4,61	-4,15	-4,59	-4,99	-4,88	-4,83	-4,36	-4,03	-4,16	-4,59
Chicoral	-4,03	-4,24	-3,81	-3,65	-3,19	-2,78	-2,50	-2,31	-3,24	-3,37	-3,58	-3,83	-3,38
Nataima	-4,27	-4,49	-4,20	-3,96	-3,35	-2,80	-2,58	-2,77	-3,63	-3,74	-3,68	-3,92	-3,62
Aeropuerto Santiago Vila	-5,54	-5,75	-5,29	-5,11	-4,65	-4,28	-4,32	-4,20	-4,90	-4,80	-4,85	-5,19	-4,91

**Tabela 5.2** – Viés da temperatura (°C) simulada pelo modelo PRECIS, utilizando como condição de contorno NCAR/NCEP reanálise, para o período 1988-2007

Estação	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Anual
Cajamarca	-3,65	-2,91	-2,60	-2,77	-2,43	-3,46	-3,45	-2,98	-2,43	-2,93	-3,23	-3,43	-3,02
Aeropuerto Perales	-2,18	-2,35	-1,92	-2,56	-2,55	-2,08	-2,96	-2,36	-1,83	-2,60	-2,66	-2,98	-2,42
Perales Hato Opia	-2,26	-2,09	-1,62	-2,41	-1,88	-2,93	-2,54	-1,85	-1,45	-2,70	-2,71	-2,96	-2,29
Chicoral	-1,01	-1,40	-1,14	-1,82	-1,04	-0,74	0,12	0,81	0,26	-2,32	-2,81	-2,93	-1,17
Nataima	-1,20	-1,65	-1,56	-2,17	-1,25	-0,72	0,06	0,41	-0,11	-2,76	-2,96	-3,03	-1,41
Aeropuerto Santiago Vila	-2,76	-3,05	-2,83	-3,68	-2,90	-2,56	-1,88	-1,21	-1,61	-4,07	-4,46	-4,59	-2,97

**Tabela 5.3** – Viés da temperatura (°C) simulada pelo modelo PRECIS, utilizando como condição de contorno HadCM3, para o período 1988-2007

Estação	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Anual
Cajamarca	-4,16	-3,74	-3,50	-3,32	-2,91	-4,07	-4,36	-4,28	-3,66	-3,48	-3,62	-3,97	-3,75
Aeropuerto Perales	-0,74	-0,37	-0,24	-0,63	-0,47	-1,59	-1,87	-1,80	-0,59	-0,51	-1,20	-1,36	-0,95
Perales Hato Opia	-4,13	-3,55	-3,24	-3,41	-3,28	-4,35	-4,85	-4,93	-3,91	-3,58	-4,12	-4,38	-3,97
Chicoral	-0,37	0,10	0,45	0,40	0,83	-0,19	-0,38	-0,03	0,81	0,31	-1,08	-1,29	-0,02
Nataima	-0,13	0,21	0,56	0,48	1,49	0,31	-0,12	-0,18	0,75	0,39	-0,69	-0,87	0,18
Aeropuerto Santiago Vila	-2,04	-1,41	-1,05	-1,38	-0,38	-1,36	-1,74	-1,79	-0,61	-1,13	-2,42	-2,92	-1,48

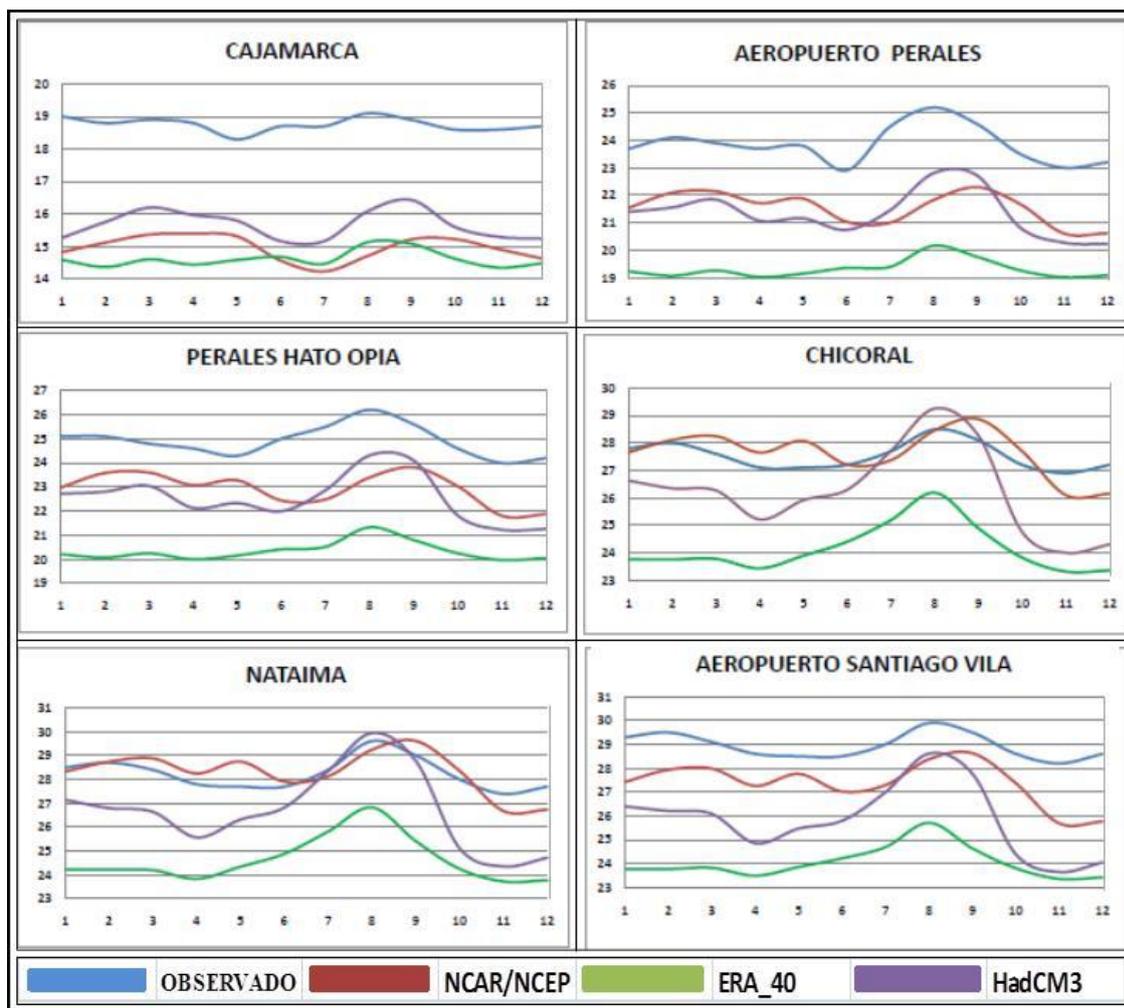


**Figura 5.2** – Viés da temperatura (°C) simulada pelo modelo PRECIS, utilizando como condição de contorno ERA40 reanálises (a), NCAR/NCEP reanálises (b) e HadCM3 (c), para o período 1988-2007

Na Tabela 5.4 são apresentados os coeficientes de correlação obtidos dos ciclos anuais das temperaturas médias multianuais do ar para o período 1988-2007, com base nos dados observados e valores simulados pelo modelo PRECIS com as três condições de contorno citadas. Embora existam subestimativas e superestimativas, o modelo representa satisfatoriamente o ciclo anual (Figura 5.3). Em relação à amplitude do ciclo anual, o modelo PRECIS – ERA40 e NCAR/NCEP – gera valores entre 1 e 1,5 °C, compatíveis com o que acontece na região. Os maiores valores do coeficiente de correlação são obtidos para a condição de contorno HadCM3, indicando que o modelo PRECIS, para essas condições de contorno, representa adequadamente o ciclo anual, excluindo o setor Cajamarca, o que pode ser atribuído à alta variabilidade da temperatura em áreas montanhosas cuja resolução ainda não é representada pela resolução do *downscaling* (25 x 25 km).

**Tabela 5.4** – Coeficientes de correlação entre os ciclos anuais das temperaturas do ar observada e simuladas com o modelo PRECIS utilizando como condições de contorno ERA40 reanálises, NCAR/NCEP reanálises e HadCM3, para o período 1988-2007

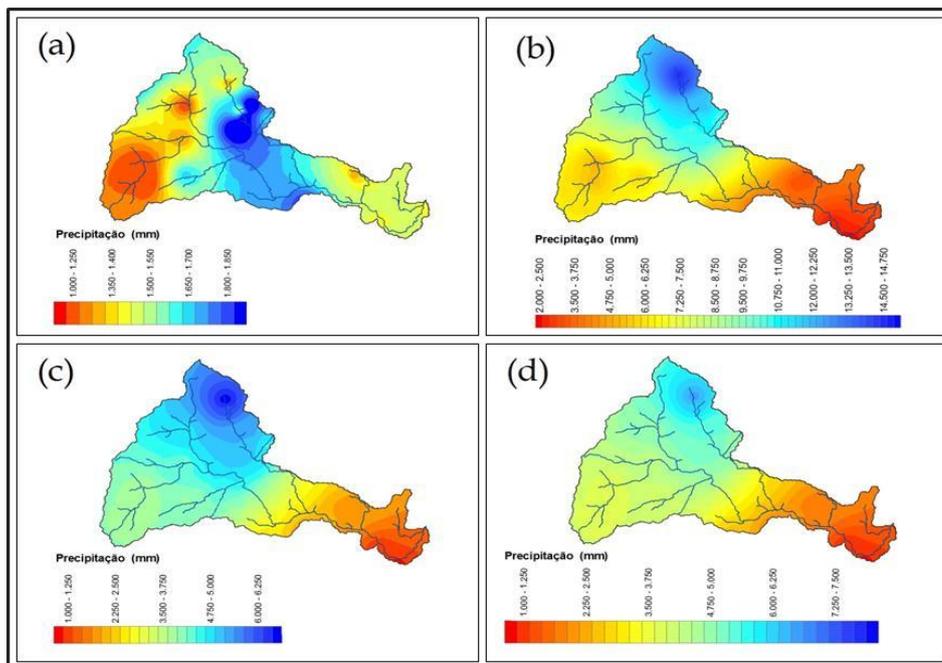
Estação	ERA40	NCAR	HadCM3
Cajamarca	0,49	0,01	0,33
Aeropuerto Perales	0,76	0,56	0,90
Perales Hato Opia	0,88	0,48	0,89
Chicoral	0,73	0,61	0,88
Nataima	0,75	0,69	0,88
Aeropuerto Santiago Vila	0,68	0,61	0,88



**Figura 5.3** – Ciclo anual da temperatura do ar observada e simulada com o modelo PRECIS, utilizando como condições de contorno dados provenientes de ERA40 reanálises, NCAR/NCEP reanálises e HadCM3, para o período 1988-2007

### 5.1.2. Previsões de precipitação

Na Figura 5.4 são apresentadas as distribuições espaciais das precipitações médias multianuais na BHRC observadas e geradas pelo modelo PRECIS com diferentes condições de contorno para o período 1988-2007. São constatadas enormes diferenças entre os dados observados e os valores simulados, e mesmo o padrão geral da distribuição espacial das precipitações não é obtido, sendo similares as distribuições geradas para as três condições de contorno. Assim, enquanto as menores e as maiores precipitações são observadas, respectivamente, nas partes sudoeste e média da BHRC, para os valores gerados as menores precipitações localizam-se na parte mais baixa e as maiores na parte alta e norte da BHRC.



**Figura 5.4** – Distribuição espacial dos valores médios multianuais de precipitação para dados observados (a) e simulados com o modelo PRECIS com condições de contorno ERA40 reanálises (b), NCAR/NCEP reanálises (c) e HadCM3 (d), para o período 1988-2007

Os coeficientes de correlação entre as distribuições de precipitações observadas e geradas com o modelo PRECIS são iguais a 0,26, 0,13 e 0,13 para, respectivamente, condições de contorno ERA40, NCAR/NCEP e HadCM3. Já os valores do RMSE foram, na mesma ordem, de 1.378 mm, 532 mm e 836 mm. Esses altos valores de RMSE podem ser explicados pela superestimação marcada na geração dos dados de precipitação, especialmente com condições de contorno ERA40, e devido aos problemas dos RCM para representar realisticamente a precipitação; os erros geralmente são devidos a definições na física interna do modelo, à inadequada representação da superfície terrestre, à variação estacional no albedo superficial, fatores que podem ter um efeito significativo nas previsões climáticas.

Os vieses mensais de precipitação – Tabelas 5.5 (ERA 40), 5.6 (NCAR/NCEP) e 5.7 (HadCM3) – são quase sempre positivos para as três condições de contorno, o que reafirma a superestimação de precipitação realizada pelo modelo PRECIS com as condições de contorno utilizadas (Figura 5.5), indicando a ocorrência, dentre outros, de erros sistemáticos. Esses erros devem ser corrigidos para que os valores de precipitação resultantes sejam utilizados como dados de entrada de um modelo hidrológico de forma a gerar estimativas mais realistas dos componentes do ciclo hidrológico em nível de bacia hidrográfica.

**Tabela 5.5 – Viés da precipitação (mm) simulada pelo modelo PRECIS, utilizando como condição de contorno ERA40 reanálise, para o período 1988-2007**

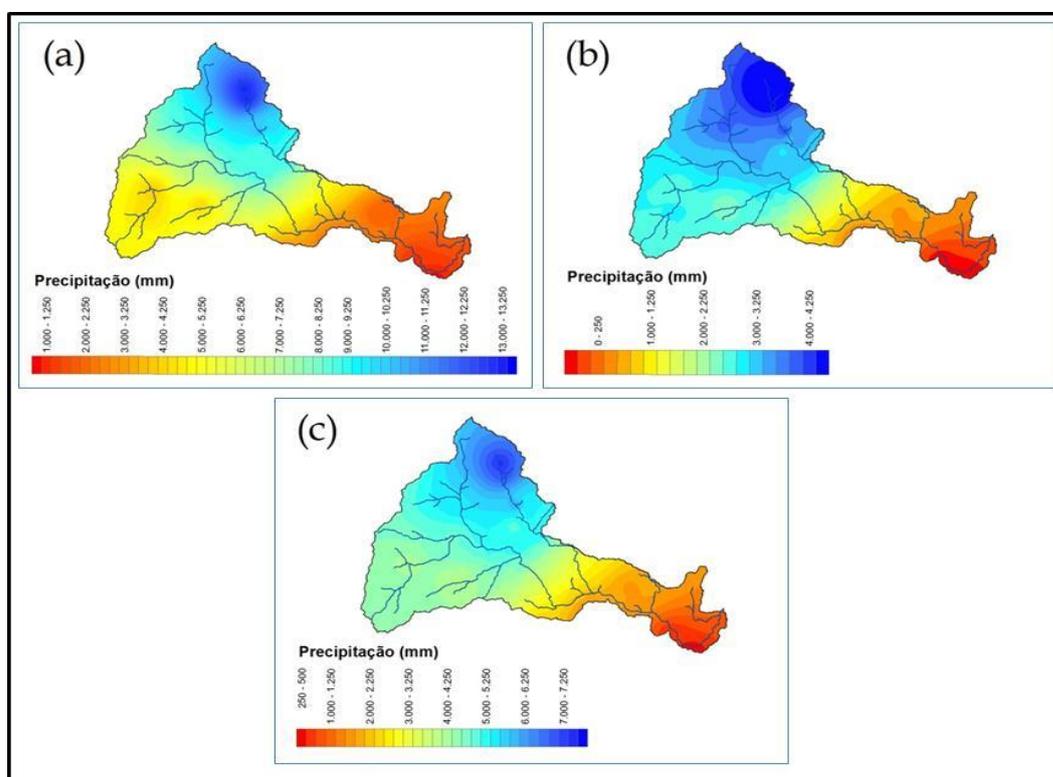
Estação	Mês											
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
La Cascada	2,8	3,84	3,28	7,24	1,79	2,08	2,44	4,66	4,29	2,86	1,59	1,72
El Rancho	76,55	103,61	45,78	47,4	326,61	32,6	23,88	30,11	42,35	44,65	50,56	47,21
El Palmar	79,6	96,16	61,39	51,84	39,61	38,26	24,8	37,35	44,06	49,2	53,15	60,47
El Placer	32,77	47,25	24,1	25,49	25,54	23,5	20	21,4	23,07	25,6	29,59	26,76
Hacienda Cucuana	25,41	33,89	19,18	10,71	13,38	16,41	14,45	27,59	26,89	18,74	16,31	18,06
Las Delicias	22,94	32,29	20,23	16,69	12,48	16,47	15,1	23,46	23,13	18,57	15,88	15,47
Toche-Ibague	42,39	52,42	4,2	36,94	30,89	34,23	26,2	41,33	39,81	38,91	41,38	34,97
Juntas	23,93	28,1	17,3	19,57	14,14	14,39	8,18	9,69	16,65	17,06	16,55	15,78
La Esmeralda	20,63	34,89	24,81	32,06	29,72	38,56	33,56	27,34	33,12	31,42	26,84	25,55
Cajamarca	47,05	51,61	33,3	31,25	24,2	26,76	25,06	35,43	34,49	36,15	36,25	29,94
El Darien	11,18	14,02	9,63	9,59	8,31	9,59	7,82	13,42	11,98	10,49	9,99	9,16
Salento	8	15,3	10,94	12,47	12,78	14,29	23,41	23,46	20,22	8,74	6,34	7,16
Hacienda Palogrande	30,25	33,92	22,57	19,09	16,31	17,91	15,03	21,62	24,64	20,72	18,52	20,77
El Secreto	30,79	37,61	2,36	21,56	20,71	23,55	17,96	21,59	23,42	24,49	29,1	23,63
Resaca	6,45	6,04	7,31	4,69	3,34	6,44	5,2	12,26	8,7	3,9	2,02	1,47
Rovira 2	2,5	2,3	3,58	3,55	1,86	2,2	3,14	10,29	4,24	1,33	1,1	0,97
Aeropuerto Perales	5,88	7,71	7,26	5,65	4,15	7,79	7,37	14,48	8,72	4,36	4,18	4,72
Perales Hato Opia	9,11	12,47	9,41	6,08	3,73	9,12	9,16	15,33	8,15	4,65	5,93	7,29
Buenos Aires	10,2	15	11,06	9,94	7,56	10,73	8,22	13,91	11,07	10,66	12,25	9,37
El Aceituno	8,28	8,51	5,89	4,14	1,97	3,81	4,38	11,02	5,87	3,51	2,6	3,48
Chicoral	21,01	25,94	13,75	14,44	12,89	21,13	20,01	36,25	21,33	14,28	11,98	13,1
Nataima	9,47	12,06	6,84	11,77	8,49	13,33	16,91	28,45	10,57	7,4	4,84	6,69
Aerop. Santiago Vila	56,72	40,94	30,25	32,77	34,33	53,94	58,15	87,79	39,08	27,82	36	27,98

**Tabela 5.6 – Viés da precipitação (mm) simulada pelo modelo PRECIS, utilizando como condição de contorno NCAR/NCEP reanálise, para o período 1988-2007**

Estação	Mês											
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
La Cascada	-2,32	-2,63	-4,8	-2,4	-3,69	-2,17	0,21	-0,17	-4,92	-2,41	-1,98	-1,69
El Rancho	25,11	32,53	15,11	14,78	9,9	16,26	13,83	15,13	14,56	18,22	24,55	21,91
El Palmar	25,66	28,32	20,21	15,42	11,61	17,88	13,77	17,41	14,49	19,47	24,7	27,9
El Placer	11,11	14,53	8,11	7,75	7,29	11,01	10,87	9,24	7,08	10,44	14,79	13,11
Hacienda Cucuana	16,06	19,11	11,35	4,75	4,69	11,11	13,39	18,05	13,17	15,82	16,94	17,43
Las Delicias	12,9	16,23	10,33	5,88	3,91	9,12	11,15	12,27	9,21	12,79	14,32	13,37
Toche-Ibague	8,95	13	12,98	10,38	8,09	15,35	14,68	18	12,21	15,02	17,91	16,02
Las Juntas	12,98	14,05	8,86	8,12	5,18	9,16	7,66	5,71	7,47	11,7	13,64	11,63
La Esmeralda	5,88	9,86	6,92	7,92	7,55	15,96	17,1	11,37	8,69	11,18	12,23	11,2
Cajamarca	13,4	13,96	9,88	7,16	5,65	11,4	13,06	15,72	9,08	14,3	17,71	13,92
El Darien	7,05	8,21	5,56	4,45	3,41	7,05	7,43	9,07	6,18	8,49	10,42	8,4
Salento	-1,54	1,86	0,51	1,89	3,06	4,67	10,13	8,66	7,19	2,92	0,66	0,36
Hacienda Palogrande	12,05	11,7	0,51	5,94	4,78	8,89	9,97	11,26	9,03	11,17	12,15	12,04
Secreto	10,53	11,67	0,51	6,73	6,25	10,93	10,44	10,66	8,36	11,92	15,4	12,09
Resaca	1,01	0,05	0,51	-0,9	-1,01	1,52	2,91	4,65	0,37	0,3	0,04	-0,46
Rovira 2	0,06	-1,78	0,51	-1,2	-1,52	-1,07	-0,47	0,44	-1,59	-1,5	-0,26	-1,18
Aeropuerto Perales	2,74	2,63	0,51	0,31	-0,94	2,28	5,67	5,17	0,58	1,87	2,65	2,63
Perales Hato Opia	3,02	4,23	0,51	-0,18	-0,83	2,1	5,13	6,16	0,9	0,87	2,49	2,36
Buenos Aires	4,32	6,49	0,51	1,54	0,21	4,6	7,97	11,05	1,89	2,81	4,09	4,78
El Aceituno	0,04	-0,69	0,51	-1,94	-2,16	-1,03	-0,17	0,31	-1,15	-1,24	-1,24	-0,93
Chicoral	4,33	4,59	0,51	2,34	1,43	6,91	9,68	13,19	3,79	3,4	3,93	4,43
Nataima	2,23	3,22	0,51	1,48	0,78	4,73	11,23	12,07	1,23	2,06	1,17	2,86
Aerop. Santiago Vila	17,02	11,51	0,51	8,1	8,5	24,15	28,97	36,61	10,81	10,6	17,47	13,23

**Tabela 5.7 – Viés da precipitação (mm) simulada pelo modelo PRECIS, utilizando como condição de contorno HadCM3, para o período 1988-2007**

Estação	Mês											
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
La Cascada	-1	3,82	2,11	4,13	-1,47	-1,16	0,19	2,05	0,57	2,16	0,3	-1,64
El Rancho	18,01	46,56	24,24	39,55	20,73	12,47	9,36	10,85	26,18	4,02	28,93	9,99
El Palmar	19,02	41,5	32,58	41,18	23,91	14,47	8,74	13,71	26,4	4,13	29,07	13,54
El Placer	8,8	22,48	14,2	21,31	16,3	9,93	9,09	8,4	14,35	22,33	16,98	6,35
Hacienda Cucuana	14,15	31,32	22,31	14,57	14,5	9,57	10,66	17,69	27,82	30,86	20,83	9,97
Las Delicias	11,8	29,65	23,86	22,17	11,56	8,81	9,88	13,19	21,06	26,4	16,31	6,66
Toche_Ibague	2,54	13,29	12,85	24,3	16,71	16,6	16,96	11,2	19,48	23,77	11,93	4,15
Juntas	11,59	25,59	20,49	22,42	11,76	7,31	5,29	5,52	15,43	23,13	17,74	7,16
La Esmeralda	4,65	16,17	13,58	25,97	18,09	14,5	14,73	10,33	19,44	26,28	14,49	4,86
Cajamarca	10,23	24,52	20,79	26,77	15,55	10,99	12,16	16,35	21,64	32,01	19,69	4,96
El Darien	6,27	13,89	11,82	13,1	8,22	5,88	5,75	8,69	12,46	16,43	12,88	5,13
Salento	-2,24	3,44	2,75	10,73	10,71	2,59	7,96	10,38	19,02	9,44	2,07	-1,22
Hacienda Palogrande	10,55	18,2	14,95	17,11	12,02	8,59	9,36	11,46	18,52	21,94	13,69	6,07
Secreto	8,17	17,03	13,92	18,41	13,6	9,01	7,87	9,7	16,35	23,16	17,37	5,45
Resaca	1,92	5,27	7,45	4,47	1,81	2,14	2,74	7,94	6,26	5,1	1,28	-1,09
Rovira 2	0,39	1,32	1,9	1,76	-0,2	0	0,71	3,86	0,81	1,22	1,13	-1,14
Aeropuerto Perales	3,08	7,59	8,37	6,67	2,99	4,11	7,77	10,87	6,4	7,34	4	1,26
Perales Hato Opia	3,8	12,42	8,53	6,8	3,1	4,16	7,2	12,03	6,3	5,91	4	0,81
Buenos Aires	5,25	14,75	9,84	9,08	5,55	7,03	12,14	19,59	8,88	9,41	5,57	2,45
El Aceituno	1,33	6,39	4,38	2,85	-0,18	-0,06	0,46	5	2,9	3,56	1,14	-1,72
Chicoral	4,42	13,77	9,29	11,72	7,74	9,95	13,24	21,27	13,56	11,77	5,12	1,4
Nataima	2,26	11,32	7,94	11,96	5,4	5,5	9,78	16,36	7,9	8,91	3,47	0,85
Aerop. Santiago Vila	13,59	19,56	17,67	27,55	21,75	23,07	26,52	36,31	24,13	24,01	20,3	5,22



**Figura 5.5 – Viés da precipitação (mm) simulada pelo modelo PRECIS com condições de contorno ERA40 reanálises (a), NCAR/NCEP reanálises (b) e HadCM3 (c), para o período 1988-2007**

Os valores dos coeficientes de correlação entre as precipitações médias mensais (e anuais) geradas pelo modelo PRECIS com diferentes condições de contorno e as respectivas precipitações observadas são apresentados nas Tabelas 5.8 (ERA 40), 5.9 (NCAR/NCEP) e 5.10 (HadCM3). Uma análise do comportamento das precipitações mensais observadas e simuladas para diferentes estações climatológicas da BHRC (Figura 5.6) mostra ciclos similares, independentemente da superestimação dos valores gerados com o modelo PRECIS. Os baixos valores dos coeficientes de correlação entre os ciclos anuais observados e simulados, algumas vezes negativos, podem ser creditados aos problemas dos RCM para representar realisticamente a precipitação, possivelmente em função da inadequada representação da superfície terrestre e da variação estacional no albedo superficial.

Na Figura 5.7 mostra-se que, para as três condições de contorno, são relativamente altos os valores dos coeficientes de correlação, especificamente nas regiões média e baixa da BHRC. As maiores áreas associadas a valores altos do coeficiente de correlação foram geradas com as condições de contorno ERA40 e HadCM3. Constata-se que o modelo PRECIS, com as três condições de contorno, apesar do superdimensionamento, gera precipitações que estão bem correlacionadas com as observadas para os setores médio e baixo da BHRC.

**Tabela 5.8 – Coeficientes de correlação entre os ciclos mensal e anual da precipitação observada e simulada com o modelo PRECIS, utilizando como condições de contorno ERA40 reanálises, para o período 1988-2007**

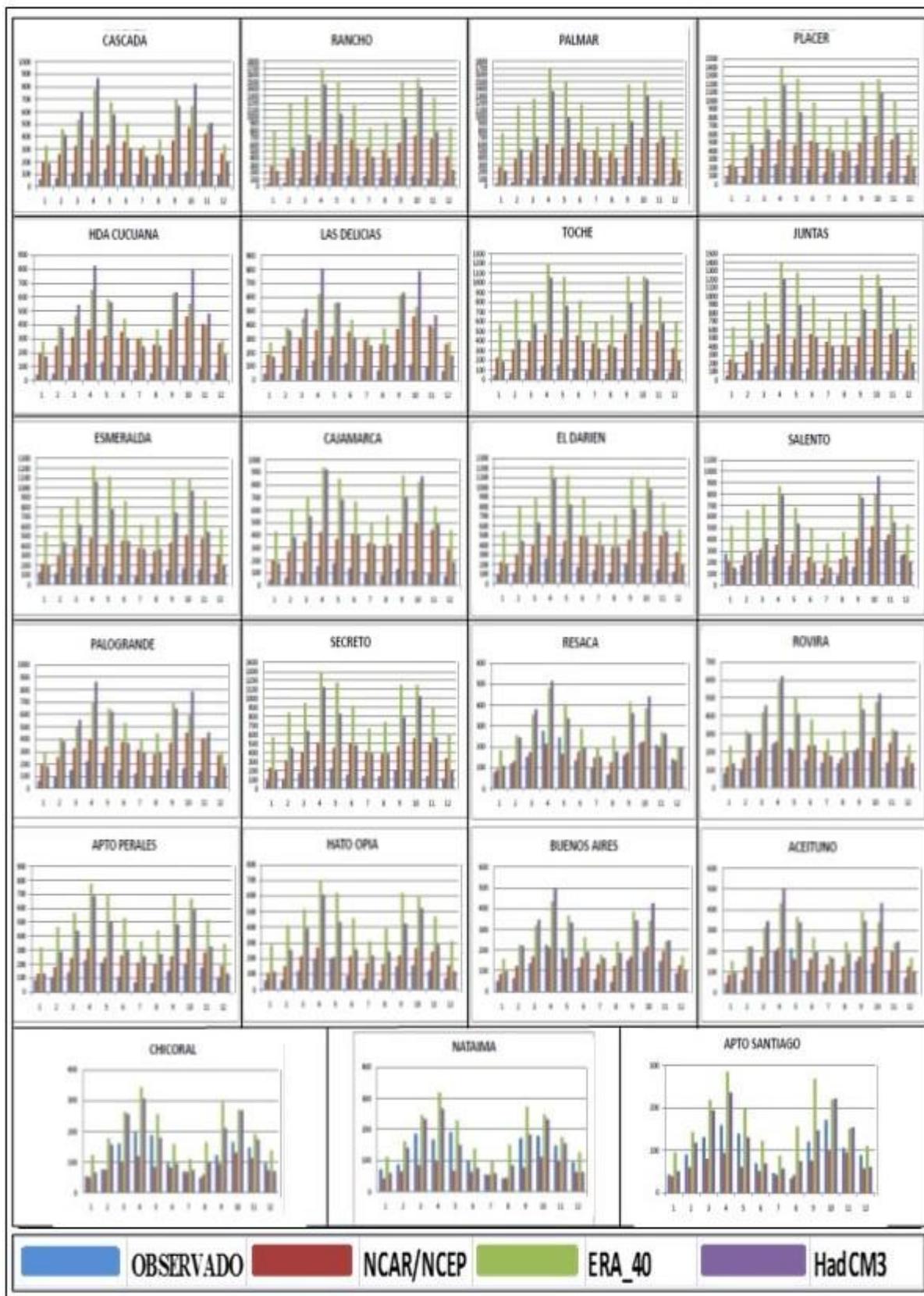
Estação	Mês												
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Annual
Cascada	0,14	0,40	0,45	0,07	0,50	0,45	0,22	0,15	0,11	0,20	0,11	-0,01	0,19
Rancho	-0,03	0,25	-0,05	-0,29	0,47	0,33	0,37	0,50	0,07	0,45	0,11	0,05	0,56
Palmar	0,06	0,52	-0,09	-0,20	0,42	0,50	-0,06	0,30	0,00	-0,09	0,37	0,15	0,30
El Placer	0,00	0,46	0,11	-0,25	0,16	0,71	0,54	0,22	0,29	0,34	0,15	-0,19	0,31
Hacienda Cucuana	0,48	0,42	0,09	0,00	0,16	0,48	0,59	0,25	0,21	0,00	-0,09	-0,23	0,58
Las Delicias	0,28	0,23	0,44	0,52	0,29	0,56	0,46	0,20	0,31	-0,10	-0,11	0,50	0,59
Toche	0,04	0,58	0,39	0,17	0,41	0,33	0,24	0,10	-0,19	0,38	-0,36	-0,27	0,30
Juntas	0,27	0,47	0,02	-0,41	0,39	0,56	0,33	0,36	0,11	0,23	0,19	0,20	0,54
La Esmeralda	0,32	0,25	0,23	0,32	0,23	0,62	0,37	0,38	0,49	-0,01	0,08	-0,29	0,38
Cajamarca	0,46	0,48	0,37	-0,38	0,56	0,62	0,29	0,38	-0,09	-0,24	-0,10	0,01	0,58
El Darien	0,20	0,39	0,10	-0,71	0,82	0,63	0,49	0,22	0,29	0,47	-0,07	-0,31	0,48
Salento	-0,08	0,48	-0,47	-0,23	0,26	0,63	0,59	0,17	0,34	0,60	-0,42	0,11	0,23
Hacienda Palogrande	0,35	0,36	0,14	-0,15	0,51	0,62	0,69	0,40	-0,12	0,24	-0,27	-0,21	0,50
Secreto	0,10	0,57	0,27	-0,42	0,45	0,58	0,36	0,24	0,19	0,11	-0,02	-0,18	0,39
Resaca	0,16	-0,08	0,21	0,01	0,47	0,69	0,61	0,48	0,05	-0,22	0,12	-0,24	0,10
Rovira	0,23	0,33	0,18	0,09	0,34	0,90	0,51	0,15	-0,02	-0,07	0,19	-0,01	0,50
Aeropuerto Perales	1,00	0,24	0,25	0,46	-0,15	0,72	0,89	0,66	0,55	0,18	0,24	0,28	0,46
Perales Hato Opia	0,26	0,45	0,51	0,19	0,32	0,68	0,28	0,41	0,05	0,08	0,18	0,10	0,33
Buenos Aires	0,48	0,26	-0,04	0,45	0,45	0,72	0,62	0,50	-0,04	-0,01	-0,02	0,00	0,33
Aceituno	0,38	0,14	0,14	0,38	0,37	0,72	0,50	0,47	0,29	0,08	-0,18	0,22	0,64
Chicoral	0,30	0,09	0,30	0,46	0,19	0,37	0,49	0,58	0,07	0,33	-0,23	0,35	0,52
Nataima	0,28	-0,61	0,72	0,14	0,42	0,55	0,67	0,60	-0,17	0,31	-0,04	0,37	0,35
Aeropuerto Santiago Vila	0,46	-0,44	0,40	0,15	0,09	0,58	0,45	0,62	0,02	0,36	-0,09	-0,03	0,42

**Tabela 5.9 – Coeficientes de correlação entre os ciclos mensal e anual da precipitação observada e simulada com o modelo PRECIS, utilizando como condições de contorno NCAR/NCEP reanálises, para o período 1988-2007**

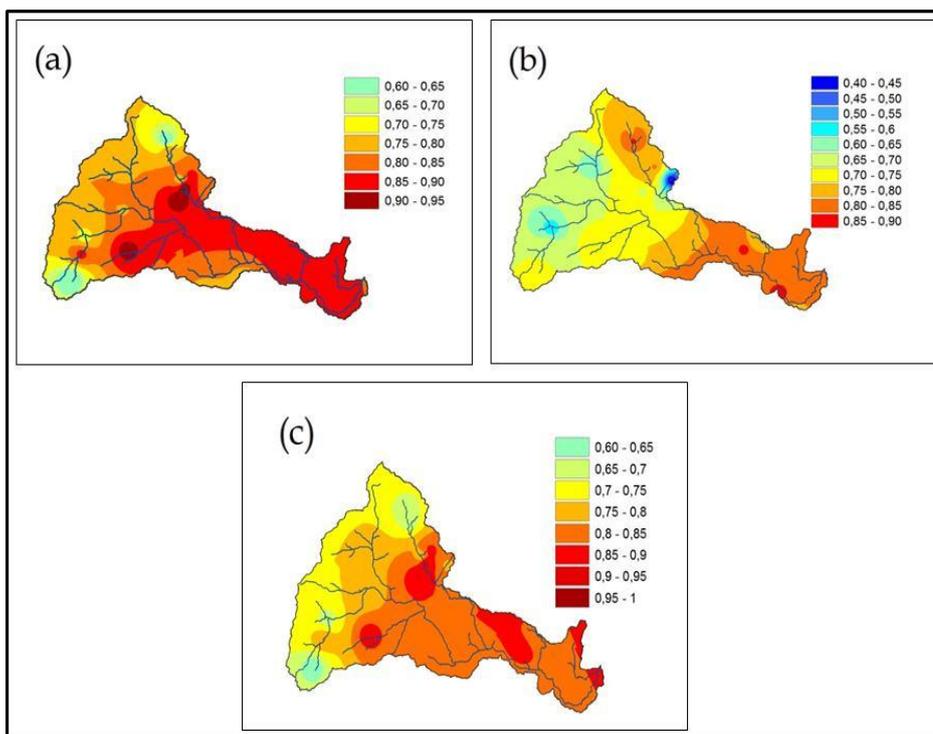
Estação	Mês												Anual
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	
Cascada	0,69	0,34	0,28	-0,05	0,25	0,21	0,12	-0,11	0,35	-0,40	-0,07	0,27	0,25
Rancho	0,49	0,24	0,70	0,18	0,12	0,45	0,13	0,02	0,34	0,38	0,35	0,43	0,41
Palmar	0,41	0,38	0,62	0,39	0,37	0,20	-0,08	0,28	-0,04	0,27	0,66	0,08	0,51
El Placer	0,80	0,37	0,54	0,25	0,18	0,10	0,13	0,12	0,10	0,22	0,46	0,41	0,50
Hacienda Cucuana	0,62	0,27	0,30	0,03	0,06	0,15	0,17	0,02	0,16	0,14	0,56	0,33	0,06
Las Delicias	0,80	0,39	-0,18	0,43	-0,09	-0,07	0,08	-0,24	0,18	0,25	0,11	0,11	-0,14
Toche	0,89	0,22	0,41	0,16	0,11	0,17	-0,05	0,22	0,50	0,34	-0,37	0,10	0,26
Juntas	0,45	0,34	0,60	0,05	0,37	0,13	0,12	0,35	0,08	0,28	0,18	0,12	0,45
La Esmeralda	0,75	0,31	-0,10	0,35	0,26	-0,03	0,31	0,16	0,05	0,34	0,39	0,51	0,61
Cajamarca	0,76	0,24	0,31	0,29	0,47	0,12	0,00	0,16	0,20	0,42	0,28	0,34	0,41
El Darien	0,68	0,23	0,61	-0,36	0,37	0,02	0,14	0,20	0,06	0,17	0,52	0,17	0,33
Salento	0,79	0,23	0,70	0,21	0,48	0,46	0,11	0,43	0,48	0,44	0,38	0,52	0,69
Hacienda Palogrande	0,61	0,49	0,22	0,09	0,24	0,31	0,29	0,12	0,31	0,28	0,62	0,02	0,39
Secreto	0,79	0,32	0,41	0,26	0,34	0,03	0,05	0,33	0,02	0,24	0,34	0,34	0,46
Resaca	0,75	0,21	0,04	0,61	0,04	0,29	0,47	-0,21	0,10	0,45	0,60	0,46	0,48
Rovira	0,49	0,24	0,28	0,17	0,37	0,40	0,26	-0,28	0,35	0,61	0,39	0,55	0,47
Aeropuerto Perales	0,38	0,23	0,25	0,02	0,16	0,35	0,37	-0,13	0,29	0,44	0,67	0,36	0,43
Perales Hato Opia	0,50	0,39	0,21	0,29	0,02	0,26	-0,09	-0,15	0,41	0,28	0,66	0,11	0,50
Buenos Aires	-0,07	0,53	0,14	0,68	0,04	0,38	0,20	-0,14	0,00	0,65	0,32	0,03	0,65
Aceituno	0,44	0,62	0,18	0,13	-0,21	0,48	-0,04	-0,15	-0,08	0,26	0,68	-0,05	0,25
Chicoral	-0,01	0,29	0,19	0,42	-0,30	0,58	0,11	-0,18	-0,14	-0,26	0,09	0,25	0,09
Nataima	0,04	0,07	0,11	0,39	-0,24	0,62	0,32	-0,18	-0,25	-0,11	0,16	0,06	-0,24
Aeropuerto Santiago Vila	0,43	0,05	0,32	0,32	-0,05	0,56	0,22	0,03	0,14	0,01	0,13	0,52	0,69

**Tabela 5.10 – Coeficientes de correlação entre os ciclos mensal e anual da precipitação observada e simulada com o modelo PRECIS, utilizando como condições de contorno HadCM3, para o período 1988-2007**

Estação	Mês												Anual
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	
Cascada	-0,10	0,26	-0,08	0,05	-0,20	0,16	0,03	0,01	-0,28	0,17	-0,31	-0,05	0,10
Rancho	0,31	0,15	0,08	-0,57	0,26	-0,05	-0,44	0,44	-0,14	0,10	-0,33	0,14	0,02
Palmar	0,09	0,31	0,14	-0,02	-0,27	0,08	-0,02	-0,26	0,03	0,19	-0,10	0,20	-0,22
El Placer	-0,17	0,37	-0,21	-0,13	0,00	0,19	-0,09	-0,29	-0,07	0,37	-0,13	-0,12	-0,30
Hacienda Cucuana	0,06	0,34	0,50	0,34	-0,22	0,14	-0,21	-0,08	0,03	0,00	0,04	-0,25	0,31
Las Delicias	0,13	0,05	-0,04	0,31	-0,27	-0,01	-0,29	-0,15	0,07	0,02	0,17	-0,21	0,05
Toche	0,08	0,15	-0,11	-0,15	-0,29	0,21	-0,17	-0,26	-0,01	0,14	-0,18	-0,27	-0,36
Juntas	-0,02	0,12	0,09	0,12	-0,19	0,24	-0,37	-0,39	0,03	0,42	-0,53	0,38	-0,15
La Esmeralda	0,08	0,22	-0,26	0,39	-0,33	0,22	-0,32	-0,26	-0,18	0,17	-0,52	-0,30	-0,32
Cajamarca	-0,04	0,63	0,08	0,14	-0,21	-0,05	-0,13	-0,27	-0,01	0,32	-0,35	-0,03	-0,07
El Darien	-0,08	0,66	0,16	0,45	0,22	-0,09	-0,13	-0,37	0,00	0,44	-0,23	0,06	0,16
Salento	0,01	0,58	0,18	0,45	0,07	0,04	-0,25	0,07	0,03	-0,14	-0,25	-0,21	0,22
Hacienda Palogrande	-0,11	0,25	0,18	0,21	-0,38	0,22	-0,32	-0,16	-0,27	0,48	-0,15	0,08	-0,17
Secreto	0,04	0,43	-0,19	0,16	-0,37	0,07	0,14	-0,39	-0,08	0,39	-0,60	-0,26	-0,30
Resaca	-0,15	0,41	0,41	0,32	-0,15	0,06	-0,12	-0,10	-0,24	0,05	-0,31	-0,01	-0,04
Rovira	-0,05	0,41	-0,16	0,24	-0,35	0,02	0,24	-0,53	-0,14	0,44	-0,50	-0,19	-0,27
Aeropuerto Perales	-0,18	0,32	0,13	0,14	-0,08	0,42	-0,12	-0,19	-0,03	0,34	-0,31	0,23	0,17
Perales Hato Opia	0,12	0,25	-0,04	0,12	-0,34	0,21	-0,01	-0,22	-0,04	0,46	-0,15	0,20	0,23
Buenos Aires	-0,15	0,19	0,12	0,05	-0,08	0,26	-0,33	-0,09	-0,45	0,19	-0,52	0,06	0,10
Aceituno	-0,03	0,24	0,11	-0,02	-0,34	0,26	-0,39	0,04	-0,03	0,37	-0,56	-0,25	0,18
Chicoral	0,11	0,06	0,53	-0,02	-0,27	-0,10	-0,14	-0,14	-0,20	0,02	-0,05	-0,37	0,25
Nataima	0,20	-0,14	0,08	0,00	0,06	0,13	0,12	-0,19	-0,23	0,18	0,02	-0,19	-0,06
Aeropuerto Santiago Vila	-0,16	0,27	0,41	-0,08	-0,13	0,11	-0,20	-0,04	0,07	0,34	-0,37	0,27	0,08



**Figura 5.6** – Ciclo anual das precipitações observadas e simuladas com o modelo PRECIS com condições de contorno ERA40 reanálises, NCAR/NCEP reanálises e HadCM3 para o período 1988-2007



**Figura 5.7** – Distribuição espacial dos coeficientes de correlação entre as séries de precipitação observadas e simuladas com o modelo PRECIS, com condições de contorno ERA40 reanálises (a), NCAR/NCEP reanálises (b) e HadCM3 (c), para o período 1988-2007

### 5.1.3. Correção de erros sistemáticos de precipitação

Os erros sistemáticos da precipitação gerada pelo modelo PRECIS estão principalmente relacionados às incertezas de representação dos RCM (topografia, cobertura vegetal, albedo, parametrização da relação solo-atmosfera, dentre outros) e aos erros do GCM utilizado para gerar as condições de contorno. Assim, são verificados erros como a ocorrência de muitos dias chuvosos com precipitações de baixa ou alta intensidades e incorretas representações da variabilidade espacial da precipitação, dentre outros; os RCM ainda apresentam limitações para reproduzir dados climáticos, principalmente em regiões montanhosas, caso da BHRC. As incertezas dos estudos de avaliação do impacto das mudanças climáticas estão principalmente relacionadas aos erros na geração de valores de precipitação utilizados como dados de entrada dos modelos hidrológicos.

Como foram gerados valores superdimensionados de precipitação com o modelo PRECIS para as condições de contorno ERA40, NCAR/NCEP e HadCM3, nas etapas seguintes desta pesquisa optou-se por corrigir os valores de precipitação obtidos com o uso das condições de contorno HadCM3, as quais têm sido amplamente utilizadas pela comunidade científica internacional, inclusive na elaboração do TAR e do AR4 do IPCC.

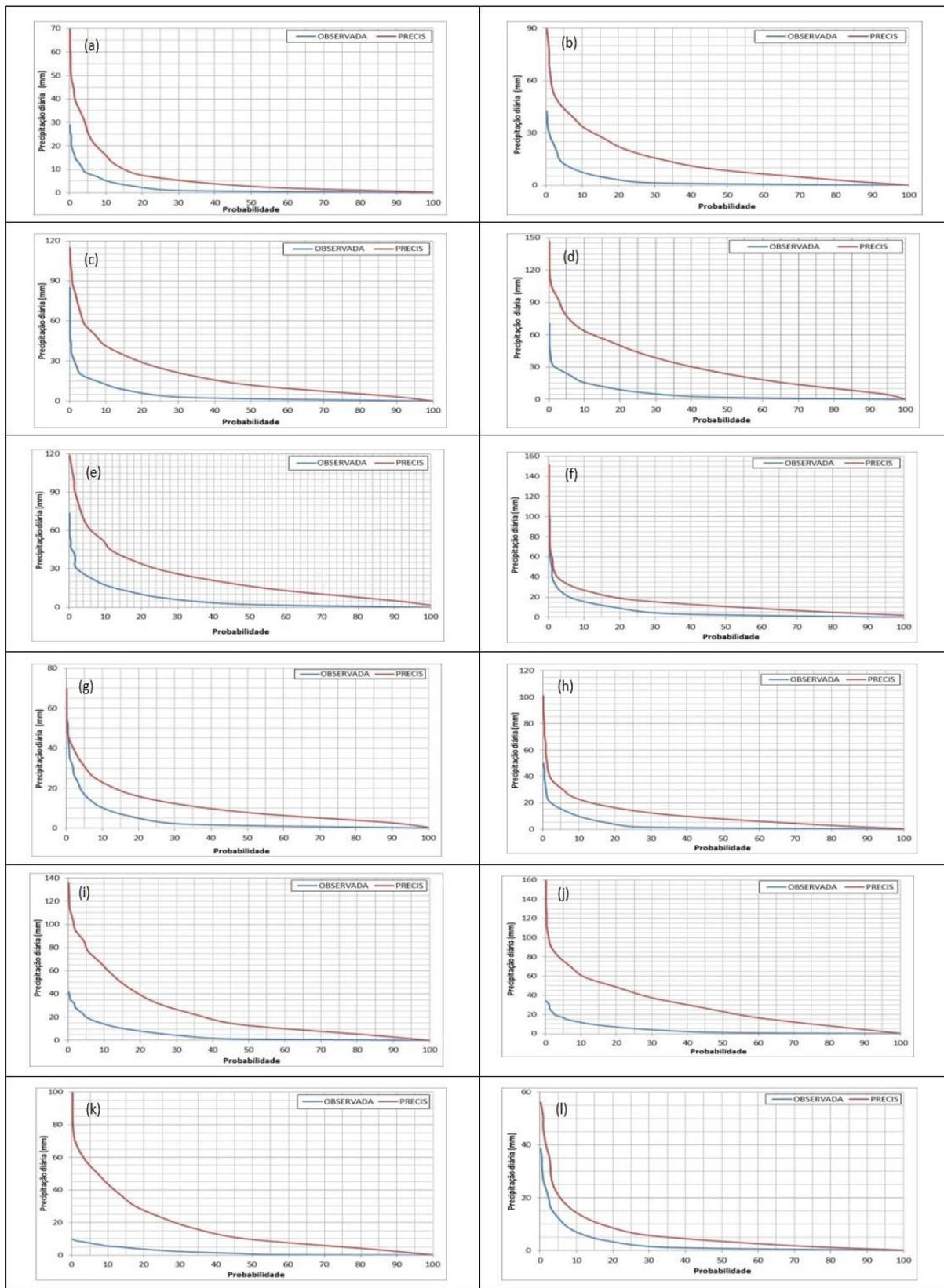
A correção prévia de erros sistemáticos permite utilizar os valores gerados por um RCM como dados de entrada de um modelo hidrológico para avaliar as alterações entre as condições atuais e futuras nos recursos hídricos relacionadas aos potenciais efeitos de mudanças climáticas. Os métodos de correção de erros não levam em conta a causa física dos vieses na precipitação e temperatura (erros na parametrização dos sistemas de circulação, erros na parametrização das nuvens e nos processos de precipitação); em geral, os erros estão relacionados à parametrização dos GCM.

Os valores de precipitação observados e aqueles gerados pelo modelo PRECIS para o cenário de emissão de gases de efeito estufa A1B para período de referência (1988-2007) são comparados para identificar os erros sistemáticos. Com base na hipótese de que os processos de geração dos erros sistemáticos ocorrem de forma similar para os períodos de referência e futuro, o ajuste obtido para o período de referência é aplicado para as precipitações geradas pelo modelo PRECIS para o período futuro (2011-2030).

Na correção dos erros sistemáticos empregou-se a metodologia de transformação da curva de distribuição de probabilidades, obtida em função dos dados observados e valores simulados para o período 1988-2007 em nível diário. Uma das vantagens da metodologia é a manutenção do sinal da mudança climática (diferenças entre o período de referência e o período futuro), enquanto que uma das desvantagens é que o processo de correção de erros sistemáticos está limitado a regiões com existência de estações meteorológicas. Além disso, essa metodologia está baseada em uma suposição de estacionariedade, ou seja, admite-se que os processos e os parâmetros de correção permanecem constantes ao longo do tempo.

Na Figura 4.11 ilustrou-se a metodologia de correção de erros sistemáticos da precipitação diária prevista pelo modelo PRECIS. Na Figura 5.8 mostra-se a sua aplicação para a estação Cajamarca, por meio da comparação das curvas de probabilidade de ocorrência dos dados mensais observados e dos valores mensais gerados pelo modelo PRECIS para o período 1988-2007. As diferenças mais acentuadas ocorrem em meses relativamente mais úmidos (abril, setembro, outubro e novembro).

Para cada valor gerado pelo modelo PRECIS é associada uma probabilidade de ocorrência e o valor corrigido associado a essa probabilidade é identificado sobre a curva de distribuição de probabilidade das precipitações observadas; repete-se o mesmo procedimento para todos os meses considerando sempre a curva relativa ao mês e ao ponto da grade de interesse.



**Figura 5.8** – Curvas de distribuição de probabilidades das precipitações mensais observadas e geradas pelo modelo PRECIS na estação Cajamarca para o período 1988-2007 – janeiro (a), fevereiro (b), março (c), abril (d), maio (e), junho (f), julho (g), agosto (h), setembro (i), outubro (j), novembro (k) e dezembro (l)

## 5.2 Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Coello

### 5.2.1 Dados de entrada do modelo SWAT

O modelo numérico de terreno da BHRC apresentado na Figura 5.9 foi gerado com altitudes variando de 5.200 m, na nascente do rio Combeima, no município de Ibagué, até 300 m, na chapada dos municípios de Coello e Flandes, com uma elevação média de 1.935 m na bacia. Observa-se que grande parte da BHRC possui declividades relativamente altas. Um relevo mais acentuado é encontrado na região das escarpas nos municípios de Cajamarca e Ibagué, nas regiões nordeste e noroeste da bacia. Assim, o rio Coello funciona parte como um rio de montanha e parte como um rio de planalto.

Na aplicação do modelo SWAT, a BHRC foi subdividida em 16 sub-bacias, cujas áreas em hectares e porcentagem são mostradas na Tabela 5.11. Para a divisão das sub-bacias foram considerados os pontos de confluência do rio Coello gerados pelo modelo a partir do MDE e os pontos de coletas de dados de vazão do IDEAM, que foram adicionados manualmente; nas Figuras 5.10 e 5.11 são apresentadas as sub-bacias e as localizações das estações fluviométricas, climáticas e pluviométricas. As classes de solo de toda a bacia foram inseridas no banco de dados de solo do modelo SWAT. Uma vez determinados os tipos de cultura, o banco de dados foi desenvolvido, incluindo dados de índice de área foliar máximo, profundidade máxima das raízes, altura máxima da cultura, energia para conversão em biomassa e temperaturas base e ótima para o crescimento das plantas.

**Tabela 5.11** – Sub-bacias geradas pelo modelo SWAT, com áreas em hectares (ha) e porcentagem (%)

Sub-bacias	Área	
	(ha)	(%)
1	4420,05	2,88
2	6862,95	4,48
3	6042,16	3,94
4	20698,02	13,50
5	6037,43	3,94
6	1806,53	1,18
7	10524,60	6,86
8	4111,79	2,68
9	5543,42	3,62
10	15429,85	10,06
11	69,48	0,05
12	9462,00	6,17
13	16146,48	10,53
14	11317,88	7,38
15	21155,06	13,80
16	13697,63	8,93

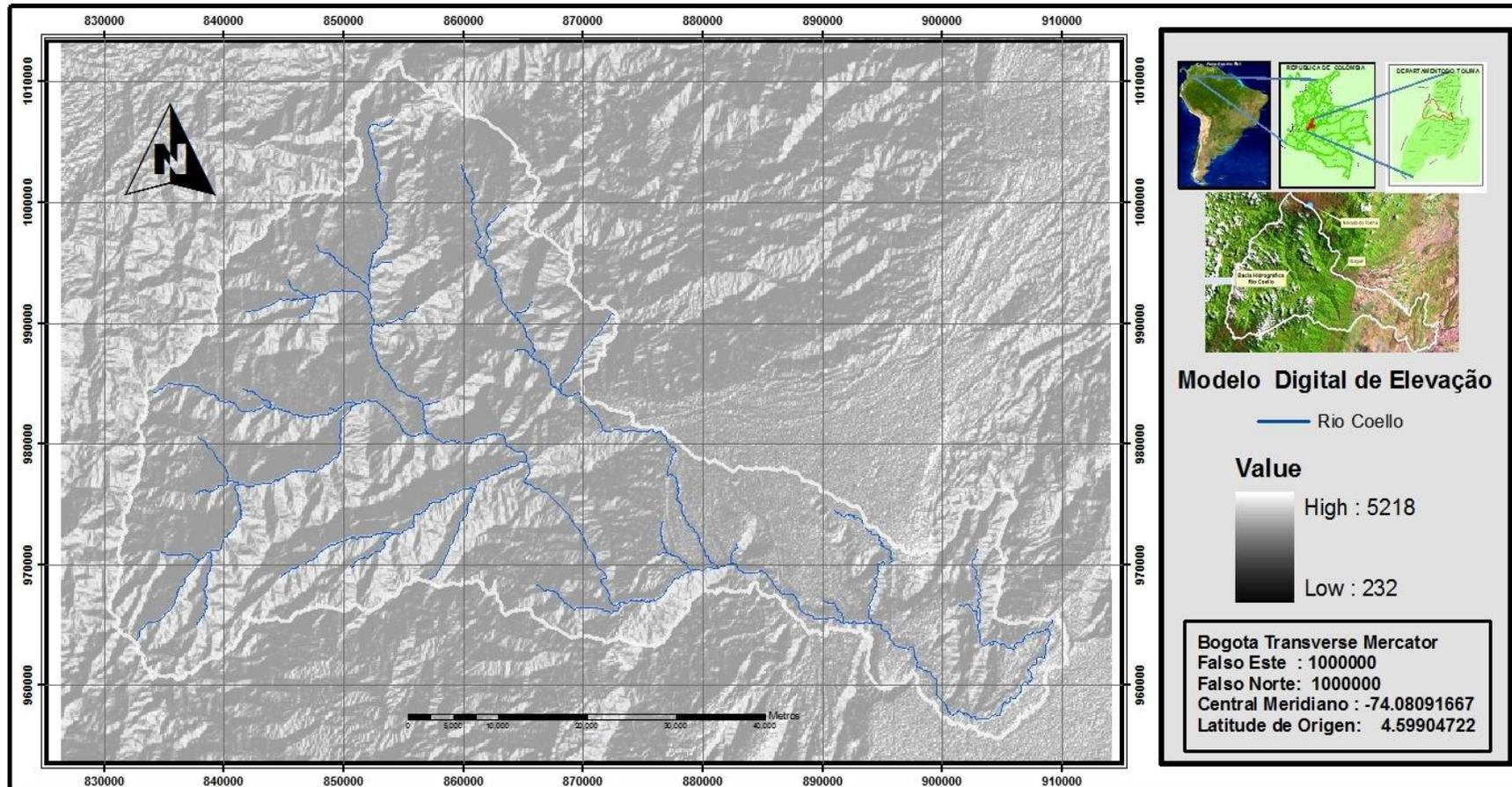
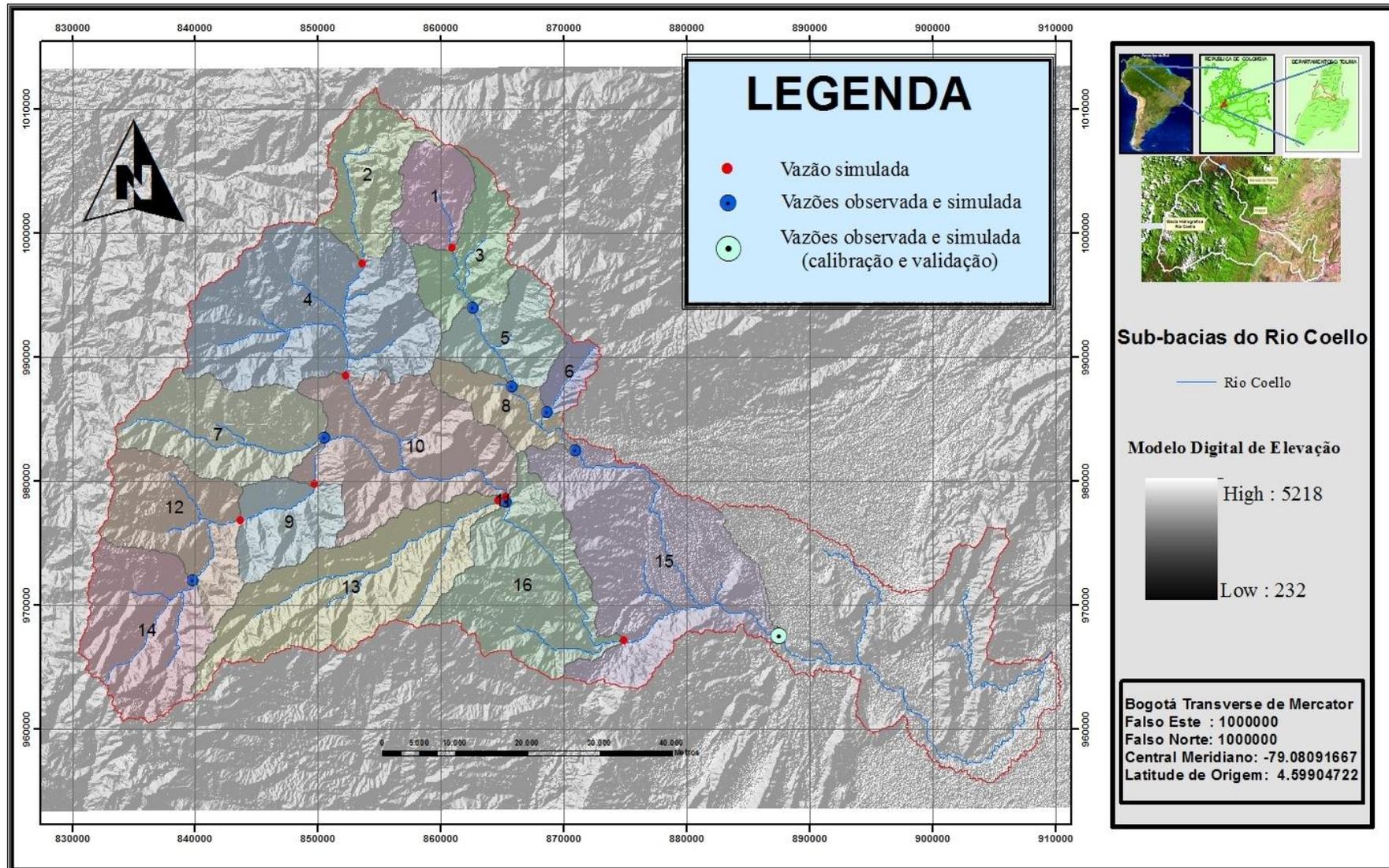


Figura 5.9 – Modelo digital de elevação (MDE) com a hidrografia principal da BHRC



**Figura 5.10** – Subdivisões da BHRC com os pontos de confluência gerados pelo modelo SWAT e os pontos adicionados indicando os locais de coleta de dados fluviométricos do IDEAM

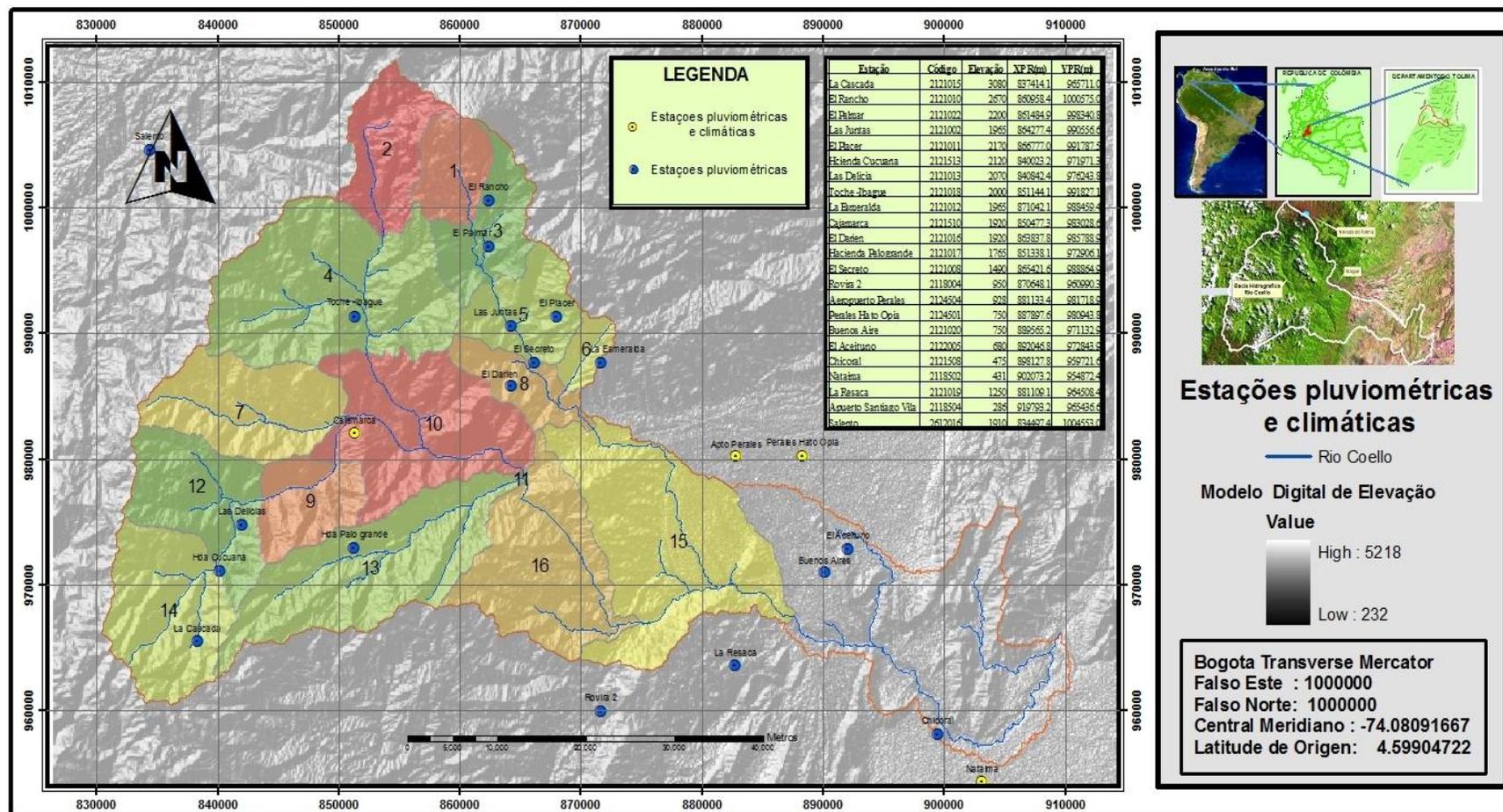


Figura 5.11 – Distribuição espacial das estações pluviométricas e climatológicas, com subdivisões da BHRC gerada pelo modelo SWAT

Para a aplicação inicial do modelo SWAT foi escolhido o maior número de postos pluviométricos disponíveis na BHRC com a maior série de dados observados de chuva. O modelo SWAT atribui a cada sub-bacia a série temporal diária (1988-2007) de uma das 23 estações pluviométricas, de acordo com a proximidade das coordenadas. No caso das variáveis necessárias para o banco de dados do modelo gerador climático WXGEN, foram utilizados os dados destas estações do IDEAM: Cajamarca, Aeropuerto Perales, Perales Hato Opia, Chicoral, Nataima e Aeropuerto Santiago Vila (Figura 5.10). Foram introduzidos no modelo os valores das seguintes variáveis:

- Número médio de dias chuvosos no mês (PCPD);
- Precipitação média mensal (PCPMM), em mm;
- Coeficiente de assimetria para a precipitação diária no mês (PCPSKW);
- Desvio padrão da precipitação diária no mês (PCPSTD), em mm/dia;
- Probabilidade de um dia chuvoso seguido de um dia seco no mês (PR\_W1);
- Probabilidade de um dia chuvoso seguido de um dia chuvoso no mês (PR\_W2);
- Precipitação máxima de 0,5 horas de todo o período de registros em um determinado mês (RAINHHMX), em mm;
- Média mensal da temperatura mínima diária (TMPMN), em °C;
- Média mensal da temperatura máxima diária (TMPMX), em °C;
- Desvio padrão da temperatura mínima diária de cada mês (TMPSTDMN), em °C; e
- Desvio padrão da temperatura máxima diária de cada mês (TMPSTDMX), em °C.

Nas Tabelas 5.12 a 5.17 são apresentados os valores dessas variáveis para cada uma das estações utilizadas considerando a série temporal definida. A duração da série temporal (RAIN\_YRS) para o cálculo desses valores foi sempre de 20 anos.

**Tabela 5.12 – Parâmetros climáticos referentes à estação Cajamarca**

Dados	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
PCPD	11,65	11,15	14,25	19,65	21,00	15,30	14,80	13,05	16,95	18,75	17,85	12,65
PCPMM	1,53	2,41	3,55	5,18	5,91	4,86	3,34	2,66	4,40	3,94	1,88	2,46
PCPSKW	2,76	3,09	2,41	2,07	2,09	2,55	3,01	2,73	2,22	2,30	1,54	3,03
PCPSTD	2,90	4,90	6,03	7,65	8,58	8,38	6,36	5,05	6,97	5,93	2,42	4,72
PR_W (1)	0,30	0,31	0,40	0,54	0,57	0,40	0,34	0,34	0,43	0,56	0,53	0,33
PR_W (2)	0,47	0,51	0,56	0,69	0,71	0,59	0,58	0,51	0,68	0,60	0,62	0,48
RAINHHMX	20,54	31,12	34,43	40,39	44,62	47,40	39,16	31,49	39,19	34,13	14,84	30,44
TMPMN	13,58	13,71	13,89	14,14	14,12	14,05	13,83	13,87	13,89	13,95	13,74	13,66
TMPMX	24,25	24,26	23,88	23,37	23,03	22,95	23,06	23,68	23,61	23,56	23,25	23,69
TMPSTDMN	1,21	1,27	1,13	1,03	1,09	1,06	1,11	1,09	1,08	1,09	1,17	1,31
TMPSTDMX	1,88	1,94	1,84	1,64	1,50	1,49	1,49	1,53	1,69	1,65	1,56	1,59

**Tabela 5.13 – Parâmetros climáticos referentes à estação Santiago Vila**

Dados	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
PCPD	6,45	8,55	11,65	15,05	14,3	10,7	6,95	5,70	10,70	13,50	12,20	8,55
PCPMM	1,39	3,19	4,24	5,36	4,65	2,34	1,52	1,10	4,03	5,57	3,54	2,89
PCPSKW	4,15	3,49	3,49	2,74	2,66	3,26	4,26	4,21	3,56	3,03	3,23	3,18
PCPSTD	4,41	8,58	10,65	10,78	9,47	5,53	5,52	3,58	10,6	12,75	8,45	7,42
PR_W (1)	0,18	0,28	0,28	0,43	0,39	0,29	0,16	0,15	0,30	0,38	0,35	0,23
PR_W (2)	0,26	0,34	0,46	0,53	0,51	0,42	0,41	0,26	0,44	0,48	0,47	0,37
RAINHHMX	32,30	51,31	60,35	55,63	51,19	34,93	40,50	28,68	62,00	67,55	49,34	44,90
TMPMN	23,50	23,77	23,63	23,47	23,03	22,61	22,3	22,99	23,2	23,05	23,01	23,10
TMPMX	34,00	34,28	33,36	32,42	32,19	33,02	34,2	35,45	34,5	32,99	32,32	32,90
TMPSTDMN	1,22	1,35	1,36	1,20	1,31	1,28	1,43	1,58	1,60	1,49	1,40	1,25
TMPSTDMX	1,94	2,30	2,39	2,23	2,23	1,84	1,76	1,83	2,37	2,31	1,77	1,77

**Tabela 5.14 – Parâmetros climáticos referentes à estação Nataima**

Dados	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
PCPD	7,35	8,55	12,70	16,30	15,05	10,80	7,35	5,75	12,20	15,40	12,80	9,60
PCPMM	2,34	3,15	6,06	5,64	6,21	3,42	1,80	1,40	5,77	5,81	4,95	3,09
PCPSKW	3,99	3,16	3,38	2,71	3,09	3,84	4,05	4,59	3,07	2,64	3,34	3,40
PCPSTD	6,99	7,59	12,86	10,67	13,71	8,91	5,54	4,77	11,21	11,41	11,53	7,86
PR_W (1)	0,20	0,25	0,30	0,46	0,39	0,31	0,18	0,14	0,28	0,39	0,36	0,26
PR_W (2)	0,29	0,36	0,51	0,60	0,57	0,46	0,43	0,30	0,53	0,57	0,48	0,41
RAINHHMX	46,36	44,70	69,22	54,84	70,38	53,21	38,59	36,65	62,12	57,35	62,46	47,09
TMPMN	22,83	23,12	23,03	22,80	22,61	22,03	21,96	22,30	22,65	22,59	22,70	22,63
TMPMX	33,01	33,43	33,41	32,70	31,89	31,84	32,00	33,28	34,94	33,89	32,24	31,33
TMPSTDMN	1,26	1,53	1,42	1,30	1,41	1,35	1,56	1,96	1,66	1,58	1,31	1,32
TMPSTDMX	1,75	2,23	2,25	2,46	2,14	2,02	1,91	1,76	1,89	2,47	2,31	1,72

**Tabela 5.15 – Parâmetros climáticos referentes à estação Perales Hato Opia**

Dados	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
PCPD	7,50	8,70	10,90	15,45	14,85	9,70	7,85	6,40	11,35	14,75	12,8	8,55
PCPMM	1,94	2,25	4,01	6,65	6,51	3,02	2,24	1,88	5,07	5,13	4,18	2,40
PCPSKW	3,79	3,36	3,14	2,62	2,39	3,50	4,06	3,90	2,75	2,54	2,41	3,56
PCPSTD	5,42	5,32	8,61	12,15	12,28	7,43	6,59	5,46	10,48	9,28	7,73	6,32
PR_W (1)	0,21	0,27	0,29	0,47	0,39	0,27	0,20	0,17	0,30	0,43	0,38	0,23
PR_W (2)	0,28	0,39	0,42	0,52	0,55	0,41	0,39	0,27	0,45	0,49	0,46	0,36
RAINHHMX	37,50	35,00	49,81	63,68	60,65	46,12	44,29	37,64	55,55	48,60	41,97	41,69
TMPMN	19,52	20,02	19,99	19,95	20,05	20,01	19,54	19,59	19,40	19,09	19,22	19,42
TMPMX	29,91	30,33	29,87	29,54	29,38	29,90	30,68	32,41	31,19	29,70	29,23	29,49
TMPSTDMN	1,42	1,13	1,27	1,29	1,53	1,41	1,20	1,23	1,08	1,68	1,47	1,01
TMPSTDMX	2,26	2,36	2,58	2,00	1,93	1,82	2,46	2,43	2,55	2,42	1,92	1,95

**Tabela 5.16 – Parâmetros climáticos referentes à estação Aeropuerto Perales**

Dados	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
PCPD	11,5	12,25	16	19,85	18,15	12,2	10,1	8,9	14,55	18,95	18,35	14,10
PCPMM	2,70	3,70	4,54	7,64	6,80	3,67	2,30	2,09	5,04	6,35	5,83	3,43
PCPSKW	3,63	2,74	2,70	2,25	2,46	3,43	3,41	3,83	2,67	2,56	2,60	3,03
PCPSTD	6,66	7,37	8,72	12,58	11,98	8,00	5,81	5,46	9,94	10,91	10,12	7,25
PR_W (1)	0,29	0,36	0,40	0,53	0,47	0,31	0,22	0,19	0,37	0,47	0,48	0,37
PR_W (2)	0,45	0,52	0,59	0,71	0,65	0,52	0,48	0,44	0,60	0,67	0,69	0,54
RAINHHMX	43,01	41,01	47,43	59,47	59,18	46,83	37,10	36,40	54,70	56,24	53,65	42,42
TMPMN	18,93	19,36	19,39	19,35	19,41	19,44	19,08	19,30	19,08	19,04	19,00	18,99
TMPMX	28,99	29,22	28,83	28,39	28,39	29,07	29,98	31,46	30,23	28,51	27,65	28,03
TMPSTDMN	0,99	0,96	1,06	0,91	0,90	1,22	0,89	1,10	1,00	0,85	0,86	0,90
TMPSTDMX	1,87	2,26	2,28	1,92	1,89	1,85	1,89	2,26	2,38	2,16	1,69	1,68

**Tabela 5.17 – Parâmetros climáticos referentes à estação Chicoral**

Dados	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
PCPD	30	28,3	30	30	30	30	30	30	30	30	29,5	30
PCPMM	2,24	5,56	8,54	10,28	6,01	3,19	2,50	3,37	7,06	8,96	5,86	2,36
PCPSKW	2,42	1,89	1,78	1,80	1,50	1,13	1,29	1,09	1,68	1,60	1,54	2,27
PCPSTD	3,02	6,17	7,92	8,41	4,56	2,60	2,27	2,85	6,27	7,78	6,11	2,97
PR_W (1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PR_W (2)	0,97	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
RAINHHMX	18,47	35,18	42,92	48,60	29,49	17,01	14,68	17,82	37,94	42,43	32,27	19,26
TMPMN	21,04	21,52	21,65	21,31	21,47	21,32	21,50	21,78	21,72	20,93	20,45	19,84
TMPMX	37,15	36,28	35,77	33,05	34,26	35,30	38,59	41,79	40,24	32,57	30,88	32,07
TMPSTDMN	0,90	1,08	0,79	0,67	0,76	0,72	0,74	0,63	0,68	0,53	0,55	0,52
TMPSTDMX	3,05	3,53	2,45	2,29	2,32	2,92	2,10	1,48	2,09	1,74	1,23	1,96

### 5.2.2 Análise de sensibilidade do modelo SWAT

Conforme comentado no item 4.3.2.5, na análise de sensibilidade do modelo SWAT são gerados valores relativos ao grau de sensibilidade dos parâmetros, os quais variam entre 1 (maior sensibilidade) e 28 (menor sensibilidade ou nenhuma sensibilidade). Na presente pesquisa essa análise, realizada considerando os dados da estação Payande, não forneceu bons resultados. O parâmetro TLAPS (taxa de lapso da temperatura, em °C/km), diretamente relacionado com o processo de derretimento da neve ou glaciais, foi classificado como de muita sensibilidade, embora somente 0,26% da BHRC tenha esse tipo de cobertura, como indicado na Tabela 4.2. Ademais, o parâmetro CN2 foi classificado como de pouca sensibilidade, de forma diferente ao normalmente encontrado em estudos similares e indicado por ARNOLD *et al.* (2000).

### 5.2.3 Calibração e validação

A calibração dos parâmetros é uma etapa de difícil execução, pois requer conhecimento da estrutura do modelo hidrológico e disponibilidade de séries de dados observados que sejam longas, contínuas e precisas, para amostrar uma gama ampla de eventos úmidos e de eventos secos em diferentes estações do ano. Neste trabalho, os parâmetros foram estimados com técnica manual, a qual é predominantemente subjetiva, sendo útil tanto para estimar a ordem de grandeza do parâmetro quanto para possibilitar o entendimento da função de cada parâmetro e de sua sensibilidade para a sua variação.

A calibração e a validação do modelo SWAT foram realizadas a partir da comparação das vazões mensais observadas e calculadas no posto fluviométrico Payande, considerando períodos de nove anos: de janeiro de 1990 a dezembro de 1998 para a calibração, e de

janeiro de 1999 a dezembro de 2007 para a validação. Na etapa de validação foram utilizados os valores dos parâmetros obtidos na etapa de calibração.

Após a análise de sensibilidade do modelo, foram realizadas as etapas de calibração e de validação dos parâmetros para todas as HRU mostradas na Figura 5.12. Foram obtidos resultados de saídas não condizentes com a realidade, uma vez que o modelo subestimou de maneira acentuada a vazão mínima na seção do posto fluviométrico Payande, como apresentado na Figura 5.13.

O modelo foi então calibrado para se obter um melhor ajuste do escoamento de base por meio da alteração dos valores dos parâmetros que influenciam o cálculo da quantidade de água subterrânea que retorna ao curso de água. Desta forma, foi realizada uma calibração manual considerando a variação dos valores de alguns parâmetros. Com base em estudos realizados na região andina colombiana com o modelo SWAT, foram escolhidos os seguintes parâmetros para realização dessa calibração manual (CIAT, 2009; CIAT, 2010): constante de recessão do escoamento de base (ALPHA\_BF), em dias<sup>-1</sup>; número de curva (CN2); fator de compensação de evaporação de água no solo (ESCO); tempo de retardo do escoamento subterrâneo (GW\_DELAY), em dias; profundidade mínima de água do aquífero raso para ocorrência de escoamento subterrâneo (GWQMN), em mm; fração de água percolada para o aquífero profundo (RCHRG\_DP); profundidade mínima de água no aquífero superficial para ocorrência de percolação para o aquífero profundo (REVAPMN), em mm; profundidade inicial de água no aquífero raso (SHALLST), em mm; e capacidade de água disponível nas camadas de solo (SOL\_AWC), em mm de água/mm de solo. Os parâmetros testados e as faixas de variação são apresentados na Tabela 5.18, bem como os valores ajustados dos parâmetros adotados no posto fluviométrico Payande.

Após a fase de calibração, procedeu-se à fase de validação do modelo. Na Tabela 5.19 estão os resultados das estatísticas de precisão empregadas na avaliação do desempenho da simulação hidrológica nas etapas de calibração e de validação do modelo SWAT. Para a fase de calibração do modelo hidrológico foram obtidos valores de 0,81 para o coeficiente de correlação e 0,615 para o coeficiente de Nash-Sutcliffe. Para o período 1990-2007 a diferença entre os volumes escoados observado e calculado foi de 0,43% (0,17 m<sup>3</sup>/s). Dessa forma, considerou-se o modelo SWAT calibrado como uma ferramenta adequada para a simulação de vazões em qualquer ponto da BHRC.

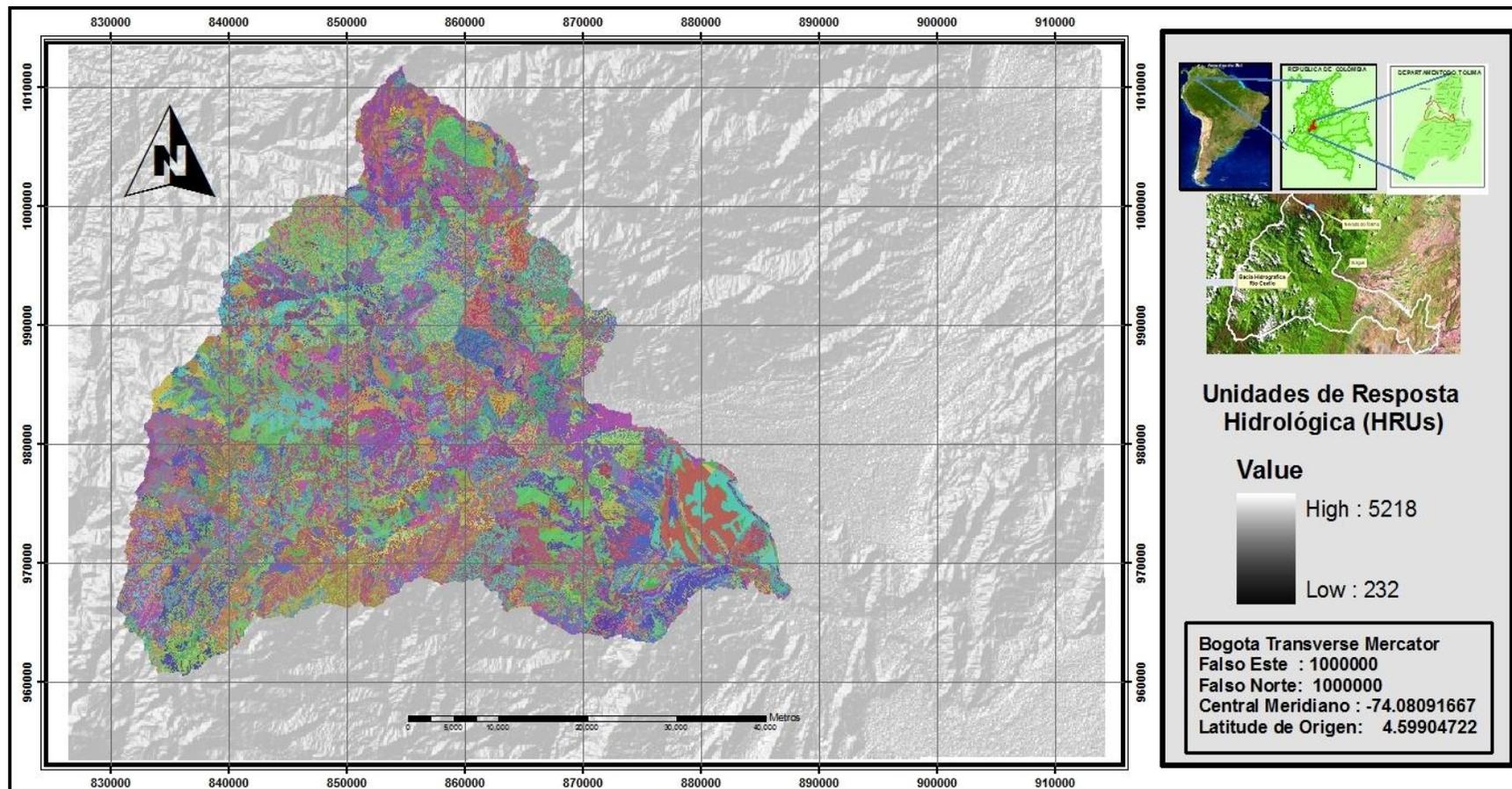
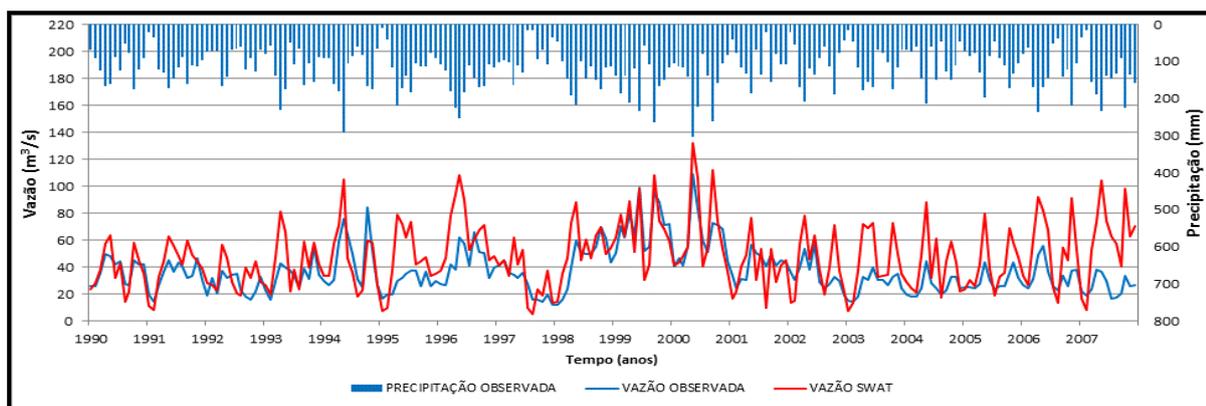


Figura 5.12 – Unidades de Resposta Hidrológica presentes na BHRC



**Figura 5.13** – Hietograma médio observado e hidrogramas observado e modelado da rodada inicial do modelo SWAT no posto fluviométrico Payande

**Tabela 5.18** – Valores dos parâmetros utilizados nas simulações inicial e final

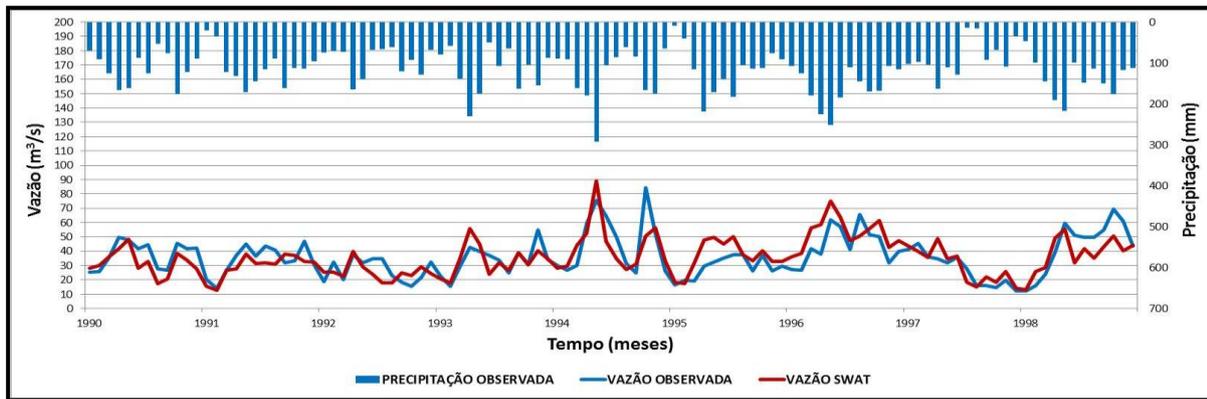
Parâmetro	Faixa de variação	Posto Payande	
		Inicial	Final
ALPHA_BF	0 – 1	0,048	0,02
CN2	-25% – 25%	–	- 15,87%*
ESCO	0 – 1	0,95	1,00
GW_DELAY	0 – 500	31	109,58
GWQMN	0 – 5.000	0	10,00
RCHRG_DP	0 – 1	0,05	0,00
REVAPMN	0 – 500	1	160,00
SHALLST	0 – 1.000	0,5	100,00
SOL_AWC	-25% – 25%	–	6,543%*

\* a calibração dos parâmetros CN2 e SOL\_AWC é realizada com base em variações percentagens de até 25% de seus valores iniciais, os quais são obtidos em função da classe e uso do solo a que se referem

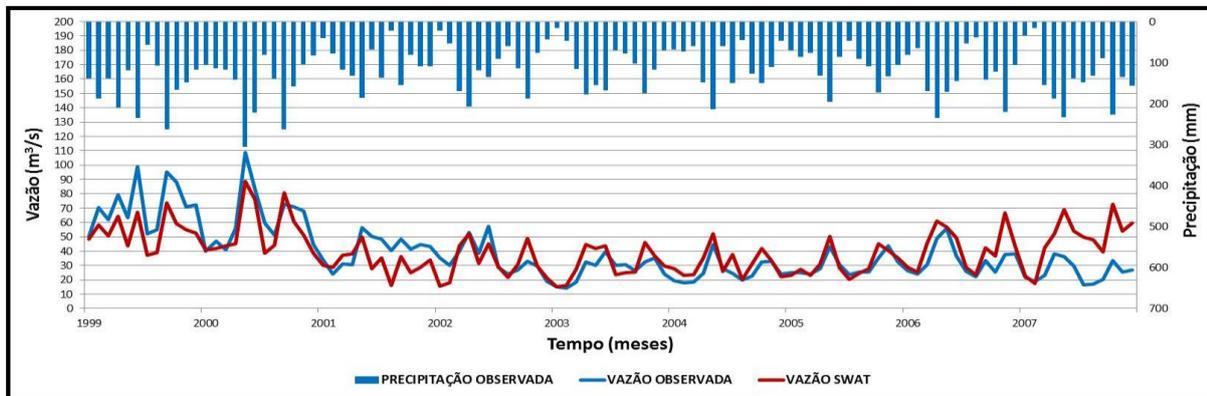
**Tabela 5.19** – Valores das estatísticas de precisão resultantes da aplicação do modelo SWAT na simulação hidrológica da BHRC para os períodos de calibração e validação

Período	Posto de controle	COE	D <sub>v</sub> %	R <sup>2</sup>
Calibração	Payande	0,615	0,8356	0,81
Validação	Payande	0,874	-1,5345	0,94

Nas Figuras 5.14 e 5.15 são apresentadas as precipitações mensais e as vazões mensais calculadas e observadas nos períodos de calibração e validação do modelo hidrológico. A análise visual das vazões indica que o modelo foi capaz de reproduzir as fases dos hidrogramas, os períodos de recessão e as intensidades dos picos. Para o posto fluviométrico Payande, os resultados mostram que, considerando os objetivos desta pesquisa, o modelo pode ser usado para representar o volume observado e o comportamento da vazão na BHRC.

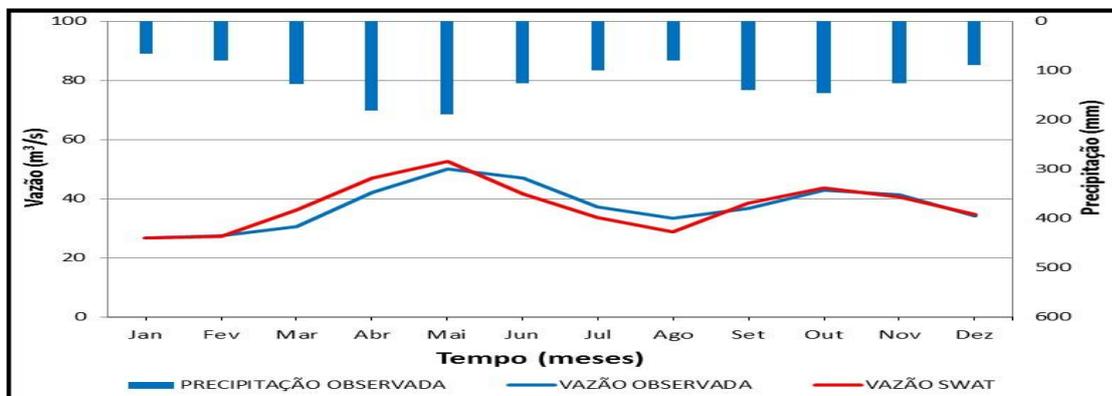


**Figura 5.14** – Hietograma médio observado e hidrogramas observado e calculado para o posto fluviométrico Payande durante a calibração do modelo



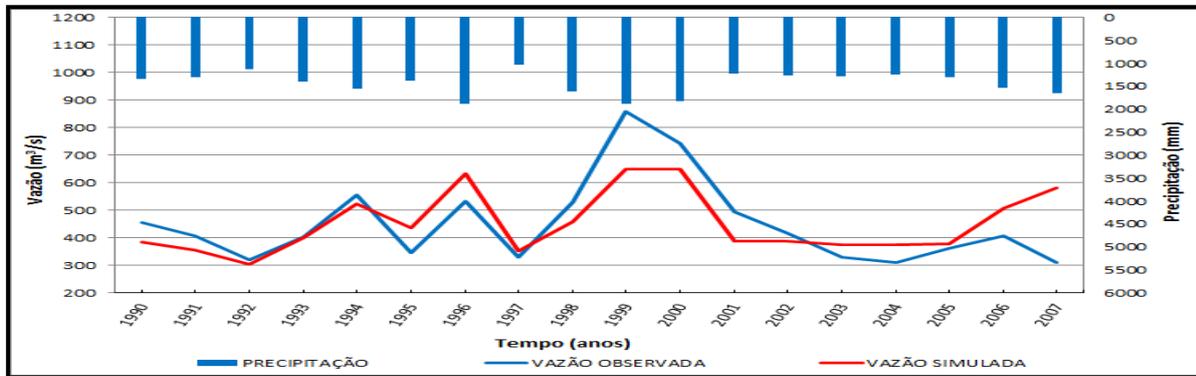
**Figura 5.15** – Hietograma médio observado e hidrogramas observado e calculado para o posto fluviométrico Payande durante a validação do modelo

Na Figura 5.16 são apresentadas as precipitações e as vazões calculadas e observadas médias mensais para o período 1990-2007. A variabilidade entre os meses úmidos e menos úmidos é representada, embora o modelo SWAT superestime as vazões de março a maio (meses pertencentes à primeira estação chuvosa) e subestime aquelas de junho, julho e agosto (os dois últimos meses de precipitações relativamente menores).



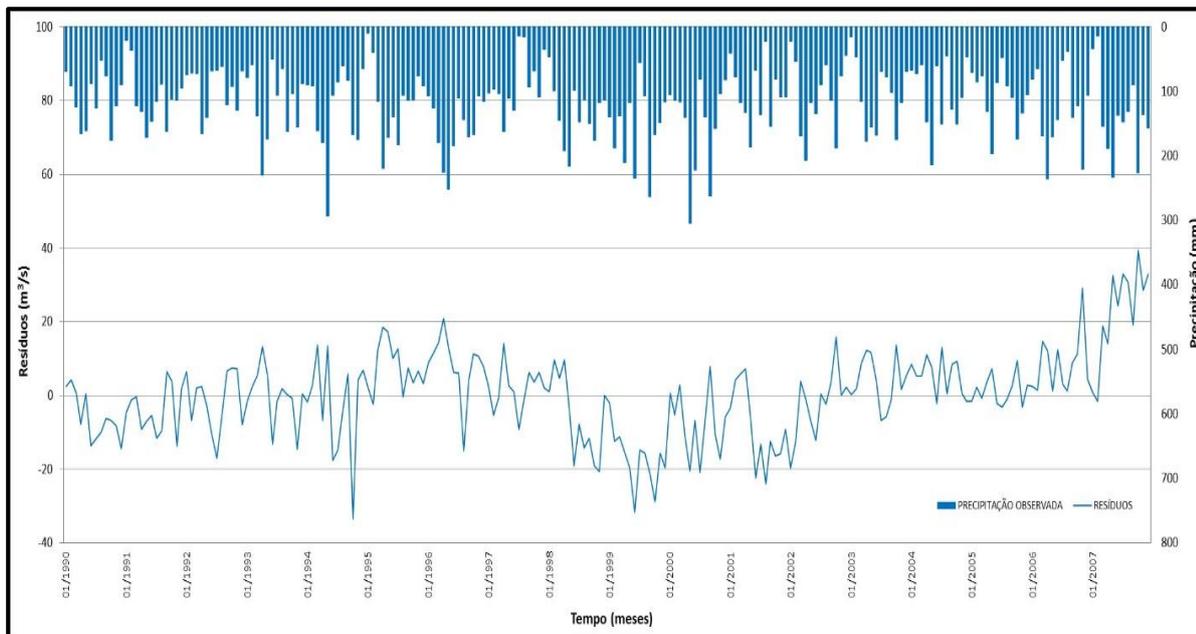
**Figura 5.16** – Valores médios mensais de precipitação, vazão calculada e vazão observada para o período 1990-2007

Na Figura 5.17 mostra-se que o modelo SWAT representou de forma satisfatória a variabilidade interanual das vazões para a etapa de calibração (período 1990-1997), mas são detectados problemas para a etapa de validação (período 1998-2007), com subestimação de valores em anos de vazões elevadas e superestimação de valores em anos de vazões relativamente mais baixas.

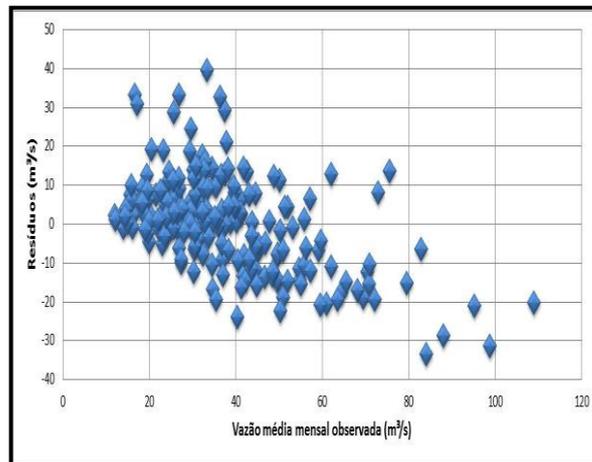


**Figura 5.17** – Variabilidade interanual de vazões para o período 1990-2007

Em relação aos resíduos ( $Q_{sim} - Q_{obs}$ ) nota-se pela Figura 5.18 a presença de vieses temporais causados pelos valores dos parâmetros obtidos na etapa de calibração. Observam-se também erros relativamente maiores nos períodos chuvosos. Na Figura 5.19 mostra-se a dispersão dos resíduos em função das vazões observadas no posto fluviométrico Payande e a existência de elevados desvios sistemáticos para os maiores valores de vazões observadas.

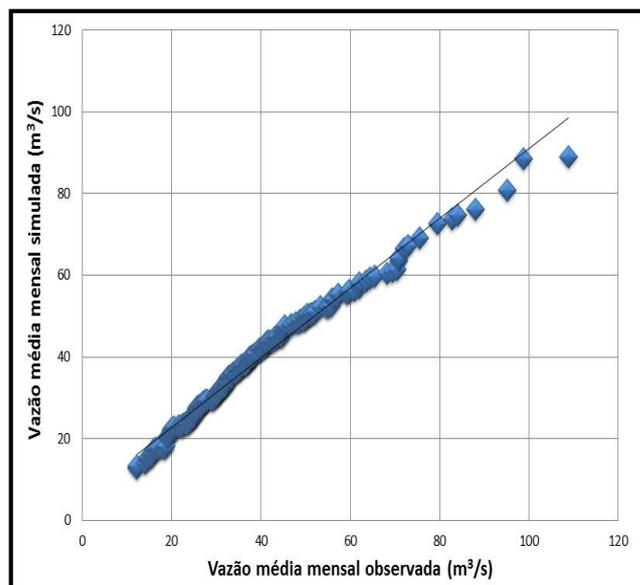


**Figura 5.18** – Evolução temporal dos resíduos entre as vazões observadas e calculadas na BHRC



**Figura 5.19** – Dispersão dos resíduos entre as vazões observadas e calculadas em relação à vazão média mensal observada na BHRC

Na Figura 5.20 são plotadas as vazões simuladas *versus* as observadas no posto fluviométrico Payande para o período total de simulação (1990-2007). Observa-se uma tendência de subestimação dos valores de vazões médias mensais mínimas (inferiores a 20 m<sup>3</sup>/s) e, em maior escala, de vazões médias mensais máximas (superiores a 80 m<sup>3</sup>/s).

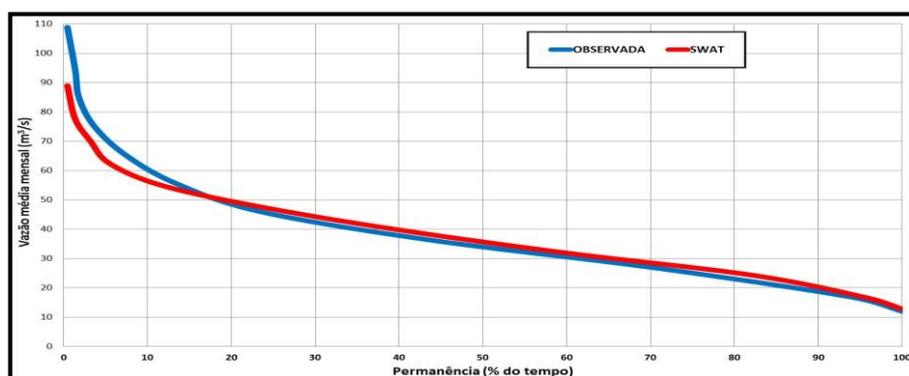


**Figura 5.20** – Vazões médias mensais simuladas *versus* observadas no posto fluviométrico Payande (período 1990-2007)

Apesar dos problemas citados, os resultados foram considerados satisfatórios, tendo em vista as magnitudes dos erros geralmente encontradas em estudos similares com simulações em base mensal, como aqueles citados no Capítulo 3 (por exemplo: DURÃES, 2010; BARRIOS & URRIBARRI, 2010; ZHANG *et al.*, 2011; e WANG *et al.*, 2012).

#### 5.2.4 Análise das curvas de permanência simuladas

Na Figura 5.21 são apresentadas as curvas de permanência elaboradas a partir dos valores mensais de vazão observados e calculados pelo modelo SWAT para o período 1988-2007. Até o percentil 18%, os valores simulados estão subestimados; verifica-se uma boa aderência dessas curvas a partir do mencionado percentil, embora as vazões de referência simuladas sejam levemente superiores.

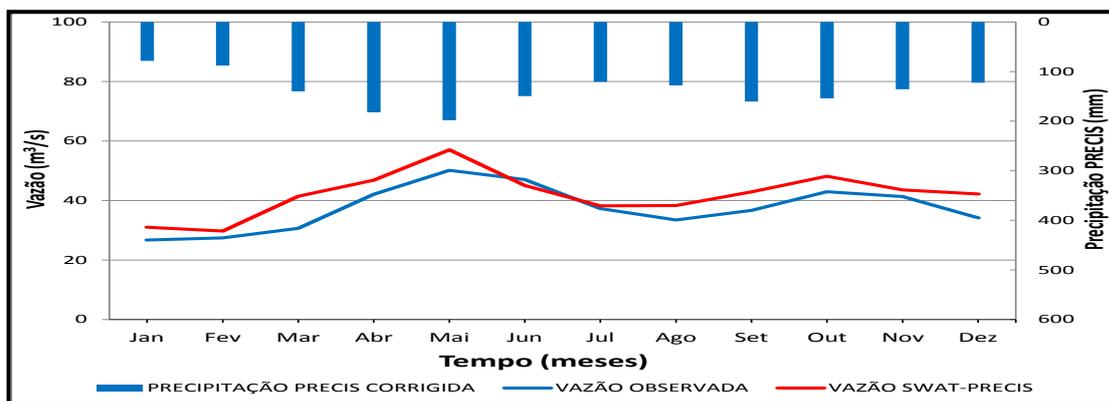


**Figura 5.21** – Curvas de permanência de vazões observadas e calculadas pelo modelo SWAT no posto fluviométrico Payande (período 1990-2007)

### 5.3 Previsões de vazão com base nas estimativas climáticas do modelo PRECIS

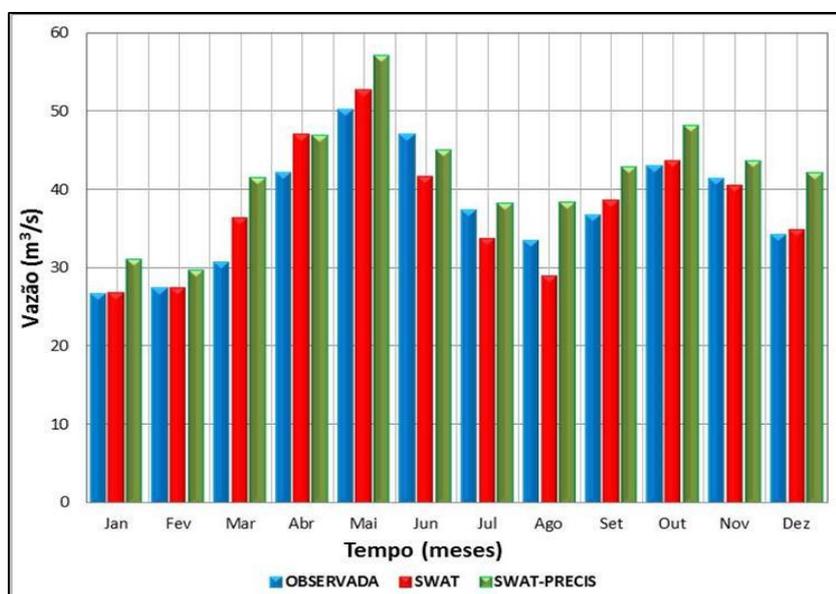
O objetivo desta fase do estudo é verificar em que medida se consegue – com base nas previsões de precipitação do modelo PRECIS, corrigidas em função dos erros sistemáticos – reproduzir as vazões da BHRC nas condições do clima atual. A verificação das previsões do modelo PRECIS foi efetuada a partir de comparações das vazões médias mensais e das curvas de permanência para o período 1988-2007 considerando: vazões observadas; vazões obtidas com o modelo SWAT a partir de variáveis climatológicas observadas; e vazões obtidas com o modelo SWAT com o uso das saídas corrigidas do modelo PRECIS.

Na Figura 5.22 observa-se que os valores médios mensais das precipitações geradas pelo modelo PRECIS, e corrigidas por meio do uso das curvas de distribuição de probabilidades acumuladas, seguem o mesmo padrão das precipitações observadas, podendo-se identificar duas estações chuvosas. Porém, como a magnitude das precipitações geradas e corrigidas é relativamente maior do que as observadas para todos os meses com os valores gerados pelo modelo PRECIS, o modelo SWAT superestima os valores médios de vazão para todos os meses, com exceção do mês de junho.



**Figura 5.22** – Valores médios mensais de precipitação gerada pelo modelo PRECIS com prévia correção dos erros sistemáticos, vazão calculada pelo modelo SWAT-PRECIS e vazão observada para o período 1990-2007

Na Figura 5.23 são apresentadas as vazões médias mensais observadas, as vazões previstas pelo modelo SWAT a partir de valores observados de precipitação e as vazões previstas pelo modelo SWAT a partir das saídas do modelo PRECIS. Confirma-se que o desempenho do modelo SWAT com valores gerados pelo modelo PRECIS é bastante inferior àquele quando são usados os dados climáticos observados. Assim, mesmo com a correção dos erros sistemáticos de precipitação, atenta-se para as limitações do modelo PRECIS na previsão de valores climáticos em regiões montanhosas.

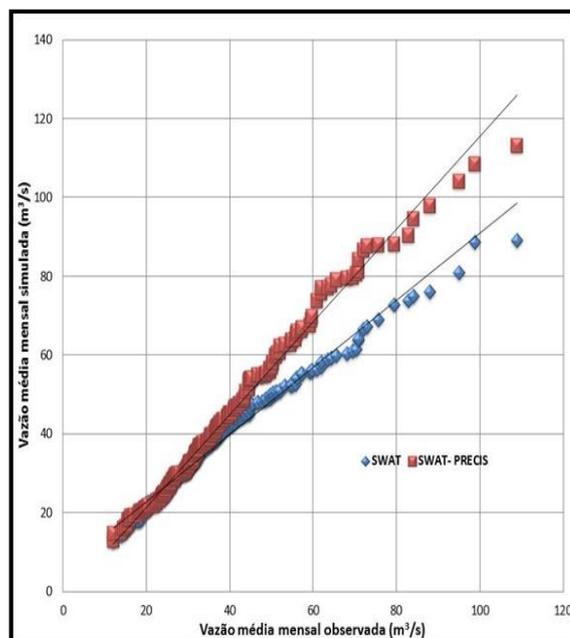


**Figura 5.23** – Vazões médias mensais (1988-2007) observadas, obtidas pelo modelo SWAT com dados climatológicos observados e obtidas pelo modelo SWAT com valores climatológicos gerados pelo modelo PRECIS (SWAT-PRECIS)

Na comparação dos valores de vazão gerados pelo modelo SWAT, aqueles obtidos a partir dos valores climáticos gerados pelo modelo PRECIS são sempre superiores aos obtidos com

dados observados de precipitação, com exceção do mês de abril. O melhor desempenho da combinação dos modelos SWAT-PRECIS nos meses junho e julho em relação aos valores observados de vazão deve ser creditado aos valores superdimensionados de precipitação gerados pelo modelo PRECIS, visto que, com dados observados de precipitação, o modelo SWAT havia subestimado as vazões para esses dois meses.

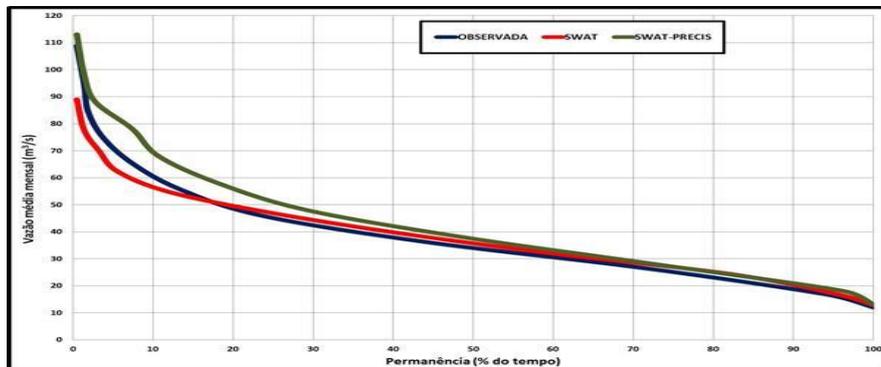
Na Figura 5.24 as vazões simuladas, obtidas pelo modelo SWAT com precipitações observadas e precipitações geradas pelo modelo PRECIS, são plotadas *versus* as vazões observadas no posto fluviométrico Payande para o período total de simulação (1990-2007). Enquanto há uma tendência de subestimação dos valores de vazões médias mensais máximas quando são utilizados valores observados de precipitação no modelo SWAT, os valores de vazão obtidos a partir dos valores de precipitação gerados pelo modelo PRECIS são sistematicamente 10% superiores do que os valores observados.



**Figura 5.24** – Comparação entre as vazões médias calculadas pelo modelo SWAT – com dados observados de precipitação (SWAT) e com valores de precipitação gerados pelo modelo PRECIS (SWAT-PRECIS) – e vazões médias observadas (período 1988-2007)

As curvas de permanência oriundas das vazões simuladas, obtidas pelo modelo SWAT com precipitações observadas e precipitações geradas pelo modelo PRECIS, e das vazões observadas no posto fluviométrico Payande para o período total de simulação (1990-2007) são apresentadas na Figura 5.25. A já discutida superestimação dos valores de vazão obtidos com o modelo SWAT a partir dos valores de precipitação gerados com o modelo PRECIS é

notada nos valores relativamente altos das vazões de referência para todos os percentis, embora possam ser considerados aceitáveis, dependendo da aplicação, os valores para os percentis superiores a 60%.



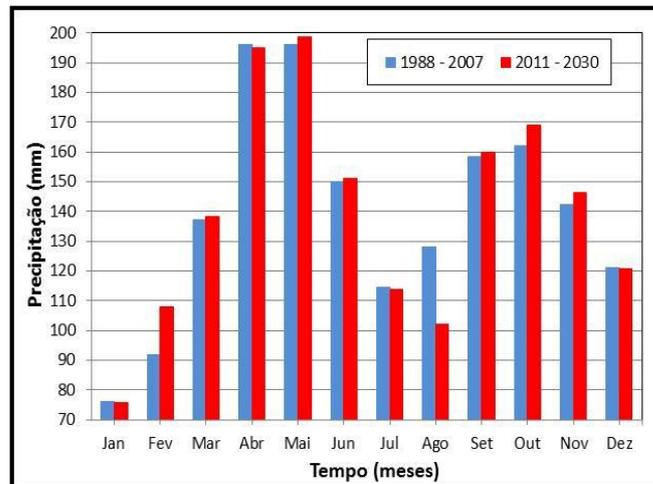
**Figura 5.25** – Curvas de permanência observada, gerada pelo modelo SWAT e obtidas da aplicação das saídas corrigidas do modelo PRECIS no modelo SWAT (SWAT-PRECIS), no período 1988-2007

#### **5.4 Influência de mudanças climáticas sobre os recursos hídricos da bacia do rio Coello**

Nesta etapa as previsões do período futuro geradas pelo modelo PRECIS foram inseridas no modelo SWAT. Previamente, os erros sistemáticos na previsão da precipitação foram corrigidos nos arquivos diários gerados pelo modelo PRECIS. O impacto de possíveis mudanças climáticas nos recursos hídricos na BHRC foi avaliado por meio de comparações entre variáveis obtidas com o modelo hidrológico para o período 2011-2030 com saídas equivalentes para o período 1988-2007, que é considerado o período atual ou de referência. Na determinação de mudanças climáticas na disponibilidade hídrica foram analisadas as variações nos valores médios mensais de precipitação, temperatura, evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração real (ET) e vazão; foram também avaliadas as alterações nos valores de  $Q_{10}$ ,  $Q_{50}$  e  $Q_{90}$  da curva de permanência.

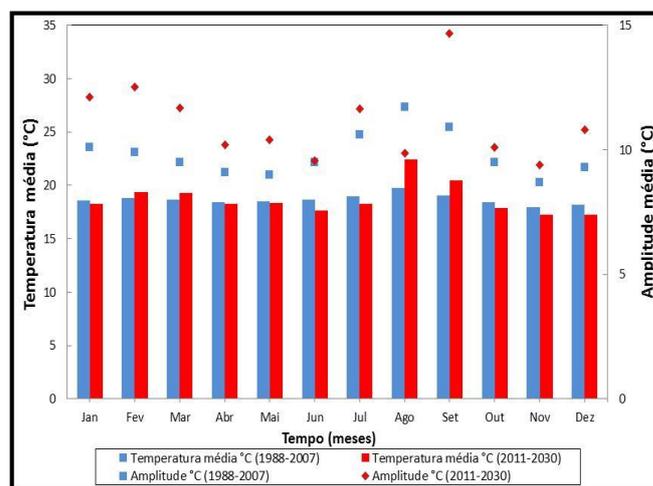
Na Figura 5.26 são apresentados os valores das médias mensais de precipitação para os períodos atual (1988-2007) e futuro (2011-2030). Considerando o período futuro em relação ao período atual, verifica-se uma diminuição na precipitação média mensal nos meses de janeiro, abril, julho, agosto e dezembro, com destaque para o mês de agosto, e um aumento da precipitação para os demais meses, em especial para o mês de fevereiro. O encadeamento dos modelos SWAT-PRECIS poderia estar identificando a ocorrência de eventos

relacionados à variabilidade climática (*El Niño* e *La Niña*) nos meses de fevereiro e agosto no período futuro.



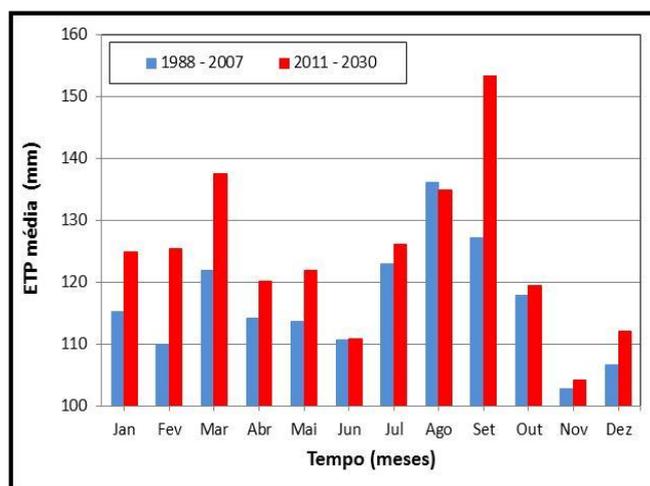
**Figura 5.26** – Precipitação média mensal para os períodos atual (1988-2007) e futuro (2011-2030)

Na Figura 5.27 observam-se aumentos (de até 2,7 °C) na temperatura média mensal em relação ao período atual em fevereiro, março, agosto (a maior diferença) e setembro, e diminuições (de até 0,9 °C) nos demais meses. Com exceção do mês de agosto, com diminuição de 1,8 °C, os valores das médias mensais das amplitudes diárias de temperatura (diferença entre as temperaturas diárias máxima e mínima) são sempre superiores – de 0,1 °C em junho a 3,8 °C em setembro – para o período futuro em relação ao atual.



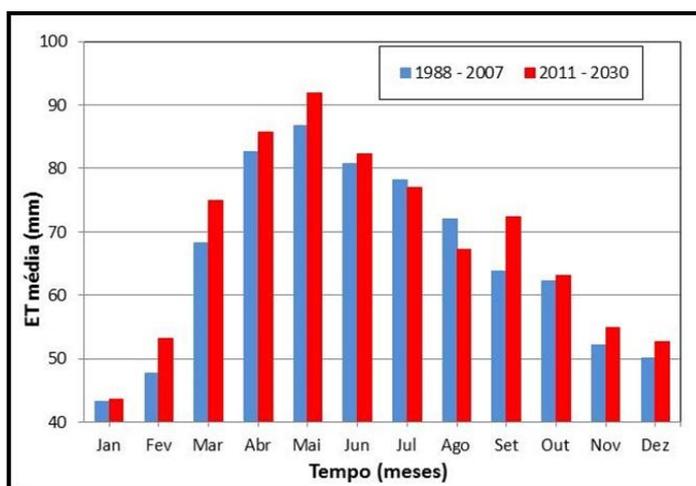
**Figura 5.27** – Temperatura e amplitude média mensal para os períodos atual (1988-2007) e futuro (2011-2030)

Para o cálculo da evapotranspiração, optou-se pelo método de Hargreaves, pela facilidade de uso e por se necessitar apenas de dados de temperatura do ar. Na Figura 5.28 são observados incrementos dos valores médios mensais de ETP para o período futuro em relação ao atual em onze meses, com redução apenas no mês de agosto. Assim, predomina a influência da variação da amplitude de temperatura sobre a variação de temperatura média na determinação da variação da ETP.



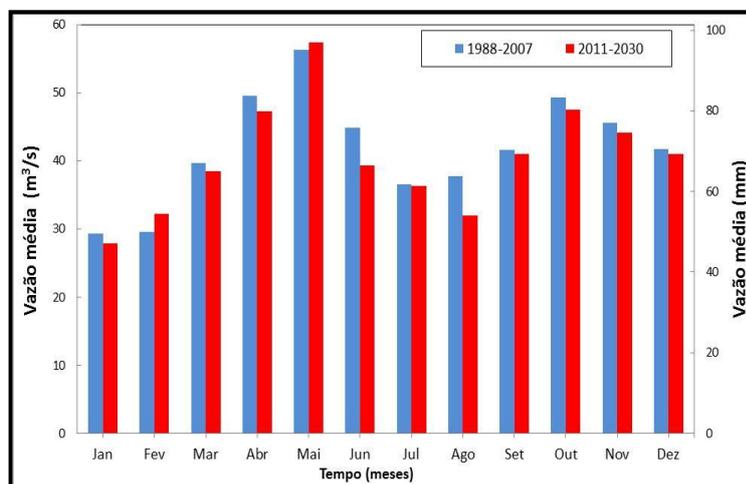
**Figura 5.28** – Evapotranspiração potencial (ETP) média mensal para os períodos atual (1988-2007) e futuro (2011-2030)

As estimativas de ET para o período 2011-2030 (Figura 5.29) são superiores às calculadas para o período atual em dez meses do ano, seguindo o comportamento observado para a ETP. As reduções são observadas nos meses de julho e agosto. Notadamente, esses valores também dependem da variação dos valores de precipitação.



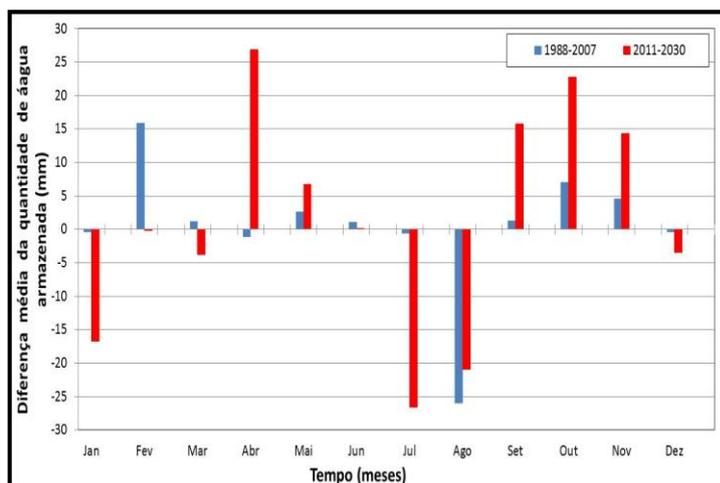
**Figura 5.29** – Evapotranspiração real (ET) média mensal para os períodos atual (1988-2007) e futuro (2011-2030)

Na Figura 5.30 são apresentados os valores de vazões médias mensais para os períodos atual e futuro. Para o período futuro são observados incrementos apenas em fevereiro (+ 9,1%), em consonância com o que se observou na Figura 5.26 para a variação de precipitação nesse mês, e maio. Assim, são previstas diminuições de vazão na maior parte do ano, afetando meses de precipitações altas e baixas.



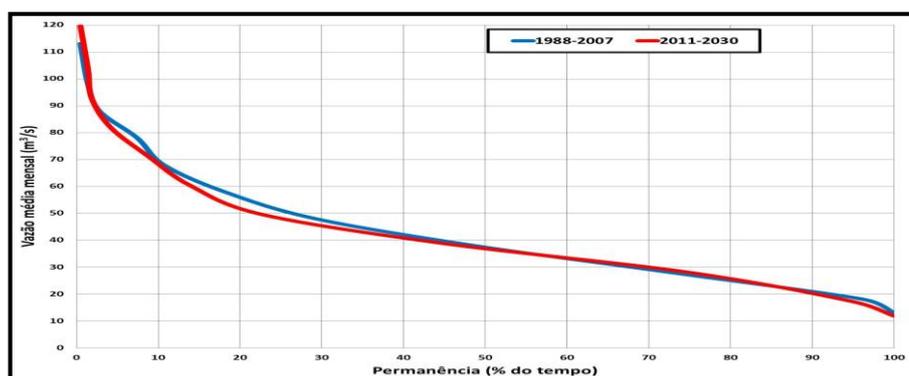
**Figura 5.30** – Vazões médias mensais para os períodos atual (1988-2007) e futuro (2011-2030)

Em média, a redução é de 3,5% ( $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) da vazão média anual, sendo as mais significativas observadas em junho (- 12,2%) e agosto (- 15,4%). Assim, considerando que fevereiro e agosto são meses de vazões relativamente baixas no clima atual, são previstos efeitos de mudança climática que aumentariam a oferta hídrica no primeiro mês, mas acentuariam a menor disponibilidade de água no segundo mês. Uma análise simplificada de balanço hídrico, com base nos valores médios mensais de precipitação, evapotranspiração real e vazão, permite inferir as diferenças médias mensais da quantidade de água armazenada na bacia, conforme valores indicados na Figura 5.31, com três principais meses de recarga (abril, setembro e outubro – meses de precipitação alta) e também três principais de deplecionamento (janeiro, julho e agosto – meses de precipitação baixa). Em termos absolutos, as variações mais significativas dessas diferenças entre os períodos atuais e futuro são observadas nos meses de junho (+ 9,1 mm), agosto (- 11 mm) e outubro (+ 9,2 mm).



**Figura 5.31** – Diferença média da quantidade de água (mm) para os períodos atual (1988-2007) e futuro (2011-2030)

Na Figura 5.32 são apresentadas as curvas de permanência para os períodos atual (1988-2007) e futuro (2011-2030). Observa-se um ligeiro aumento de picos no período futuro, e uma redução da vazão associada ao percentil de 10%; fica evidente esse fato no cruzamento da curva de permanência do período atual e aquela do período futuro.



**Figura 5.32** – Curvas de permanência para os períodos atual (1988-2007) e futuro (2011-2030)

Na Tabela 5.20 são apresentados os decréscimos percentuais das vazões  $Q_{10}$ ,  $Q_{50}$  e  $Q_{90}$  do período futuro em relação às equivalentes para o período atual. Essas probabilidades de excedência (10%, 50% e 90%) são um indicativo dos extremos e da mediana da curva de permanência. Para o percentil 10%, que corresponde às cheias, estima-se um decréscimo de 1,6% ( $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Para o percentil 50%, que corresponde à mediana, a redução estimada é de 1,3% ( $0,50 \text{ m}^3/\text{s}$ ) nos valores médios da vazão; se comparadas às variações nos valores médios de vazão (3,5%), fica claro que há uma redução mais acentuada na média do que na mediana, sugerindo que a distribuição estatística de vazões se desloca em direção às maiores

vazões, significando que as vazões de menor frequência do período futuro sofrem maiores reduções do que a própria média anual. Por fim, para o percentil 90%, que corresponde às estiagens, a redução é de 3,8% (0,80 m<sup>3</sup>/s) para o período 2011-2030.

**Tabela 5.20** – Variação percentual das vazões médias anuais nos percentis 10%, 50% e 90% para o período futuro (2011-2030) em relação ao período atual (1988-2007)

Período	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Variação da vazão	
		(m <sup>3</sup> /s)	(%)
1988-2007	Q <sub>10</sub> = 69,4		
2011-2030	Q <sub>10</sub> = 68,3	-1,1	-1,6
1988-2007	Q <sub>50</sub> = 37,4		
2011-2030	Q <sub>50</sub> = 36,9	-0,50	-1,3
1988-2007	Q <sub>90</sub> = 21,0		
2011-2030	Q <sub>90</sub> = 20,2	-0,80	-3,8

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O principal objetivo deste trabalho foi prever o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica andina sob cenários de mudanças climáticas, a partir do acoplamento *off-line* (unidirecional) do modelo de circulação regional PRECIS e o modelo de simulação hidrológica SWAT. O modelo PRECIS foi aninhado ao modelo de previsão climática global HadCM3, e os resultados da previsão climática foram inseridos no modelo SWAT. Procurou-se avaliar a qualidade das previsões climáticas (temperatura e precipitação) do modelo PRECIS, principalmente comparando os valores observados e simulados, com a finalidade de determinar a sua representatividade da climatologia da bacia hidrográfica.

Essa integração de modelos atmosféricos e hidrológicos como ferramenta para prever o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica sujeita a mudanças climáticas requer previsões climáticas derivadas de um cenário de emissão de gases efeito estufa; escolheu-se nesta pesquisa o cenário A1B, que é considerado um cenário de estabilização ou equilíbrio entre todas as fontes de energia.

Embora haja controvérsia sobre a existência ou não de mudanças climáticas, existem fortes evidências de que o aquecimento global observado nos séculos XX e XXI pode ser atribuído às atividades humanas. Assim, com base nos resultados apresentados, algumas conclusões e recomendações podem ser tiradas deste trabalho.

Com o modelo PRECIS foi possível representar relativamente bem a distribuição espacial da temperatura média anual do ar da bacia de estudo; deve-se ressaltar que esse modelo, com as três condições de contorno utilizadas, não consegue representar o detalhe nas partes altas dessa bacia hidrográfica. Os valores do erro quadrático médio são relativamente baixos, indicando que o modelo PRECIS representa de forma adequada a distribuição espacial da temperatura observada na região.

Na distribuição espacial da precipitação anual na bacia hidrográfica, observam-se grandes diferenças entre os dados observados e valores simulados; a distribuição gerada pelo modelo PRECIS utilizando como condição de contorno ERA40 reanálises apresenta valores mais próximos aos dados observados. Os valores do erro quadrático médio são altos, o que

explica a superestimação da precipitação, ressaltando que o modelo não consegue representar a distribuição espacial da precipitação sobre a bacia hidrográfica.

As diferenças entre as precipitações observadas e simuladas mostram a necessidade de se efetuar ajustes nos valores simulados, com a finalidade de diminuir os erros sistemáticos; as simulações do ciclo anual da precipitação mostram ciclos similares aos observados com um bom grau de aproximação. A variabilidade interanual da precipitação é satisfatoriamente reproduzida quando o modelo PRECIS utiliza condições de contorno NCAR/NCEP e ERA40 reanálises.

Como a medida direta de variáveis climáticas futuras não é possível, destaca-se que qualquer enfoque metodológico proposto para estimar essas variáveis e identificar os impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos em nível de bacia hidrográfica terá um grau de incerteza. Porém, a identificação e a quantificação das incertezas derivadas do cenário de emissão de gases efeito estufa utilizado, das parametrizações do modelo climático global HadCM3, do modelo climático regional PRECIS, do modelo hidrológico SWAT e de seus parâmetros de entrada não foram objeto de análise e quantificação nesta pesquisa.

As simulações com o modelo SWAT foram consideradas adequadas para o período de 1990-2007, quando as precipitações observadas foram usadas como dados de entrada. Foram obtidos valores do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe de 0,615, no período de calibração, e de 0,874, no período de validação, embora a análise gráfica tenha mostrado que não foi alcançado um bom ajuste para as vazões mínimas.

Em relação à discretização espacial das células, com o modelo SWAT foi obtido um ajuste adequado na resolução de 30 x 30 m e um número maior de Unidades de Respostas Hidrológicas, o que pode fornecer melhor discretização da área em termos do Número de Curva e, conseqüentemente, possibilitar um entendimento mais refinado dos fatores que causam maior impacto na bacia. Sendo assim, é recomendável trabalhar com a utilização de múltiplas Unidades de Respostas Hidrológicas quando se deseja estudar o impacto das alterações climáticas sobre a dinâmica hidrológica da bacia.

Os dados físicos obtidos para a bacia de estudo, que foram considerados de boa qualidade, possibilitaram determinar os mapas de grupos de tipos de solos e grupos de uso do solo e cobertura vegetal adequado às necessidades do modelo SWAT. Todavia, o uso de mapas

mais detalhados, principalmente de solos, pode melhorar os resultados do modelo, facilitando o ajuste pela redução do número de parâmetros de calibração.

Na presente pesquisa buscou-se um avanço para o entendimento de como as mudanças climáticas podem afetar os recursos hídricos, gerando informações que podem ser aproveitadas por tomadores de decisões. Ressalta-se, porém, que as projeções dos efeitos das mudanças climáticas nos recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Coello devem ser utilizadas com cautela, face às limitações e incertezas do enfoque metodológico proposto.

Julga-se que o enfoque metodológico proposto apresenta-se promissor para a avaliação dos possíveis efeitos de mudanças climáticas nos recursos hídricos em bacias hidrográficas andinas. A metodologia desenvolvida com base no encadeamento e integração *off-line* de modelos climáticos com o modelo SWAT pode ser uma ferramenta útil na identificação de eventos climáticos extremos, como *La Niña* e *El Niño* Oscilação Sul, no futuro, pois poderia identificar a ocorrência desses episódios no período 2011-2030, nos meses de agosto e fevereiro, respectivamente.

As maiores incertezas do enfoque metodológico proposto podem estar associadas à superestimativa da precipitação; assim, espera-se que a continuidade de estudos possa reduzir as incertezas derivadas do acoplamento *off-line* de modelos climáticos e hidrológicos.

Em pesquisas futuras o uso de modelos hidrológicos menos complexos e com menores requerimentos de informação poderia ser uma alternativa economicamente viável e tecnicamente possível para avaliar potenciais impactos de mudanças climáticas em bacias hidrográficas andinas com informação escassa. Adicionalmente, sugere-se avaliar as incertezas derivadas do uso de modelos climáticos regionais e modelos hidrológicos em estudos de impactos de mudanças climáticas em nível de bacia hidrográfica. Finalmente, recomenda-se incorporar nas análises os efeitos de mudanças de usos do solo nos recursos hídricos em bacias hidrográficas andinas devido a influências antrópicas.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, L. M. Simulações da variabilidade do clima presente sobre a América do Sul utilizando um modelo climático regional. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, São Paulo, 2007.

ANDERSON, M. L.; CHEN, Z.-Q.; KAVVAS, M. L.; FELDMAN, A. Coupling HEC-HMS with atmospheric models for prediction of watershed runoff. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 7, n. 4, p. 312-318, 2002.

ARNOLD, J. G.; MUTTIAH, R. S.; SRINIVASAN, R.; ALLEN, P. M. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. *Journal of Hydrology*, v. 227, n. 1-4, p. 21-40, 2000.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 34, p. 73-89, 1998.

BARRIOS, A. G.; URRIBARRI, L. A. Aplicación del modelo SWAT en los Andes Venezolanos: Cuenca Alta del río Chama. *Revista Geográfica Venezolana*, v. 51, n. 1, p. 11-29, 2010.

BEVEN, K. Changing ideas in hydrology – the case of physically based models. *Journal of Hydrology*, v. 105, n. 1-2, p. 157-172, 1989.

BHASKARAN, B.; JONES, R. G.; MURPHY, J. M.; NOGUER, M. Simulations of the Indian summer monsoon using a nested regional climate model: domain size experiments. *Climate Dynamics*, v. 12, n. 9, p. 573-587, 1996.

BINDER, L. C. W. Climate change and watershed planning in Washington State. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 42, n. 4, p. 915-926, 2006.

BRAGA, A. C. F. M.; GALVÃO, C. O.; ARAÚJO, E.; SOUZA, E. P.; OLIVEIRA, K. F.; CIRNE, W. Acoplamento operacional de modelos atmosféricos, hidrológicos e de gerenciamento de recursos hídricos. In: Simpósio Internacional de Climatologia, Fortaleza-CE. 2005.

BROWN, L. R. *Eco-economia: contruindo uma economia para a Terra*. Salvador: UMA, 2003. 368 p.

CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL (CIAT). Impacto del uso de la tierra en la generación de caudales y sedimentos: caso cuenca del rio Tunjuelo - Cundinamarca. Santiago de Cali, 2010. 67p.

CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL (CIAT). Impacto del uso de la tierra en la generación de caudales y sedimentos: el caso de las cuencas Tulua-Morales, Guabas, Sabaletas, Amaime, Nima, Bolo, Fraile, Desbaratado y Palo. Santiago de Cali, 2009. 62p

CHANG, H.; EVANS, B.; EASTERLING, D. The effects of climate change on stream flow and nutrient loading. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 37, n. 4, p. 973-985, 2001.

CHANG, K. H.; KIM, J. H.; CHO, C. H.; BAE, D. H.; KIM, J. Performance of a coupled atmosphere-streamflow prediction system at the Pyungchang River IHP basin. *Journal of Hydrology*, v. 288, p. 210-224, 2004.

CHAPLOT, V. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO<sub>3</sub>-N loads predictions. *Journal of Hydrology*, v. 312, p. 207-222, 2005.

CHAPMAN P. Sorry to ruin the fun, but an ice age cometh. 2008. Disponível em: <<http://www.theaustralian/news.com.au/story/0,25197,235833765013480,00>>. Acesso em: Mar. 2010.

CHOU, S. C.; MARENGO, J. A.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; PEQUERO, J. F.; ALVES, L. M.; KAY, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. *Climate Dynamics*, v. 38, p. 635-653, 2012.

CHOU, S. C.; TANAJURA, C. A. S.; XUE, Y.; NOBRE, C. A. Validation of the coupled Eta/SSiB model over South America. *Journal Geophysical Research*, v. 107, p. 34-37, 2002.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. Hidrología aplicada. Santafé de Bogotá, McGraw-Hill. 1994, 584 p.

CHRISTENSEN, N. S.; WOOD, A. W.; VOISIN, N.; LETTERMAIER, D. P.; PALMER, R. N. The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado River basin. *Climatic Change*, v. 62, p. 337-363, 2004.

COLLINS, M.; TETT, S. F. B.; COOPER, C. The internal climate variability of HadCM3, a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, v. 17, p. 61-81, 2001.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL TOLIMA (CORTOLIMA). Caracterización socioeconómica de la cuenca hidrográfica del río Coello. Ibagué, Colombia, 2005. 142p.

COSTA, A. C.; SANTOS, J. A.; PINTO, J. G. Climate change escenarios for precipitation extremes in Portugal. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 108, n. 1-2, p. 217-234, 2012.

COSTA, M. H.; FOLEY, J. A. A comparison of precipitation datasets for the Amazon Basin. *Geophysical Research Letters*, v. 25, n. 2, p. 155-158, 1998.

CUATRECASAS, J. Aspectos de la vegetación natural de Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, v. 10, n. 40, p. 221-268, 1958 *apud* MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE DE COLOMBIA. Paramos – Programa para el manejo sostenible y restauración de ecosistemas de la alta montaña Colombiana. Bogotá, 2002. 71 p.

CULLEN, M. J. P. The unified forecast/climate model. *Meteorological Magazine*, v. 122, n. 1449, p. 81-94, 1993.

CUNHA, L. V.; OLIVEIRA, R.; NUNES, V. B. Impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos de Portugal. *Climate Change in Portugal, Scenarios, Impacts and Adaptation Measures*. [s/n], p. 1-13, 2008.

DIAZ-NIETO, J.; WILBY, R. L. A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: impacts on low flows in the River Thames, United Kingdom. *Climatic Change*, v. 69, p. 245-268, 2005.

DIBIKE, Y. B.; COULIBALY, P. Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models. *Journal of Hydrology*, v. 307, p. 145-163, 2005.

DI LUZIO, M.; SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G.; NEITSCH, S. L. *ArcView interface for SWAT 2000 – User's Guide*. Temple: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 2002. 352 p.

DURÃES, M. F. Caracterização e avaliação do estresse hidrológico da bacia do rio Paraopeba, por meio de simulação chuva-vazão de cenários atuais e prospectivos de ocupação e uso do solo utilizando um modelo hidrológico distribuído. 134 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

EEROLA, T. Mudanças climáticas globais: passado, presente, futuro. In: Fórum de ecologia, Florianópolis, 2003, 10 p. Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/mudancasclimaticas/proclima/file/publicacoes/impactos\\_vulnerabilidade/portugues/eerola\\_mc.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/mudancasclimaticas/proclima/file/publicacoes/impactos_vulnerabilidade/portugues/eerola_mc.pdf) >. Acesso em: 10 mar. 2012. EEROLA, T. Let it burn? More emissions for the debate on climate change. *Geologi*, n. 4-5, p. 124-127, 2003.

FOWLER, H. J.; BLENKINSOP, S.; TEBALDI, C. Linking climate change modelling to impact studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, v. 27, 1547-1578, 2007.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol. 50 (4), p. 1211-1250, 2007.

GEWEX Continental-Scale International Project (GCIP): A review of progress and opportunities. Washington, D.C., National Academy of Science, 1998. 93 p. *apud* SILVA, B. C. *Previsão hidroclimática de vazão para a bacia hidrográfica do rio São Francisco*. 2005. 227 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GIORGI, F.; HEWITSON, B.; CHRISTENSEN, J.; FU, C.; JONES, R.; HULME, M.; MEARNS, L.; VON STORCH, H.; WHETTON, P. *Regional climate information – evaluation and projections*. The Scientific Basis, Contribution of Working Group 1 to the

Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge Univ. Press, 2001. p. 583-638.

GIORGI, F.; MEARNS, L. O. Introduction to special section: Regional climate modeling revisited. *Journal of Geophysical Research*, v. 104, n. D6, p. 6335-6352, 1999.

GLEICK, P. H., Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes. *Journal of Hydrology*. V. 88, p. 97-116, 1986.

GONDIM, R. S.; CASTRO, M. A. H.; EVANGELISTA, S. R. M.; TEIXEIRA, A. S.; JUNIOR, S. C. F. F. Mudanças climáticas e impactos na necessidade hídrica das culturas perenes na Bacia do Jaguaribe, no Estado do Ceará. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 43, n. 12, p. 1657-1664, 2008.

GORDON, C.; COOPER, C.; SENIOR, C. A.; BANKS, H.; GREGORY, J. M.; JOHNS, T. C.; MITCHELL, J. F. B.; WOOD, R. A. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, v. 16, p. 147-168, 2000.

GOSAIN, A. K.; RAO, S.; ARORA, A. Climate change impact assessment of water resources of India. *Current Science*, v. 101, n. 3, p. 356-372, 2011.

GROTCH, S. L.; MACCRACKEN, M. C. The use of general circulation models to predict regional climate change. *Journal of Climate*, v. 4, p. 286-303, 1991.

GUTIÉRREZ-REY, H. J. Clasificaciones climáticas. Bogotá (Colombia) Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT): 1991, 87 p.

HAY, L. E.; CLARK, M. P. Use of statistically and dynamically downscaled atmospheric model output for hydrologic simulations in three mountainous basins in the western United States. *Journal of Hydrology*, v. 282, p. 56-75, 2003.

HAY, L. E.; CLARK, M. P.; WILBY, R. L.; GUTOWSKI, W. J.; ARRITT, R. W.; TAKLE, E. S.; PAN, Z.; LEAVESLEY, G. H. Use of regional climate model output for hydrologic simulations. *Journal of Hydrometeorology*, v. 3, p. 571-590, 2002.

HIROTA, M.; NOBRE, C.; OYAMA, M. D.; BUSTAMANTE, M. M. The climatic sensitivity of the forest, savanna and forest-savanna transition in tropical South America. *New Phytologist*, v. 187, p. 707-719, 2010.

HOREL, J. D.; PECHMANN, J. B.; HAHMANN, A. N.; GEISLER, J. E. Simulations of the Amazon basin circulation with a regional model. *Journal of Climate*, v. 7, p. 56-71, 1994.

HUANG, G.; KADIR, T.; CHUNG, F. Hydrological response to climate warming: The Upper Feather River Watershed. *Journal of hydrology*, v. 426-427, p. 138-150, 2012.

IGAC. *Estudio general de suelos y tierras para la zonificación del departamento del Tolima*. Instituto Geografico Agustin Codazzi, 1997.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2007. Disponível em: [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4\\_wg1\\_full\\_report.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4_wg1_full_report.pdf). Acesso em fevereiro de 2011.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Third assessment report*, Climate change 2001: Working group II: Impacts, adaptation, and vulnerability. 2001.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories*. In: PENMAN, J.; KRUGER, D.; GALBALLY, I.; HIRAISHI, T.; NYENZI, B.; ENMANUEL, S.; BUENDIA, L.; HOPPAUS, R.; MARTINSEN, T.; MEIJER, J.; MIWA, K.; TANABE, K. (Ed.). IPCC/OECD/IEA/IGES, Hayama, Japan, 2000.

JAIN, S. K. Calibration of conceptual models for rainfall-runoff simulation. *Hydrological Sciences*, v. 38, n. 5, p. 431-441, 1993.

JASPER, K.; GURTZ, J.; LANG, H. Advanced flood forecasting in Alpine watersheds by coupling meteorological observations and forecast with a distributed hydrological model. *Journal of Hydrology*, n. 267, p. 40-52, 2002.

JHA, M.; PAN, Z.; TAKLE, E. S.; GU, R. Impacts of climate change on stream flow in the Upper Mississippi River basin: a regional climate model perspective. *Journal of Geophysical Research*, v. 109, 2004.

JONES, R. G.; NOGUER, M.; HASSELL, D. C.; HUDSON, D.; WILSON, S. S.; JENKINS, G. J.; MITCHELL, J. F. B. *Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS*. Exeter, UK: Met Office Hadley Centre, 2004. 40p.

JONES, R. G.; MURPHY, J. M.; NOGUER, M.; KEEN, A. B. Simulation of climate change over Europe using a nested regional-climate model. II: Comparison of driving and regional model responses to a doubling of carbon dioxide. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 123, n. 538, p. 265-292, 1997 *apud* ALVES, L. M. Simulações da variabilidade do clima presente sobre a América do Sul utilizando um modelo climático regional. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, São Paulo, 2007.

JONES, R. G.; MURPHY, J. M.; NOGUER, M. Simulation of climate change over Europe using a nested regional-climate model. I: Assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 121, p. 1413-1449, 1995.

KALNAY, E.; CAI, M. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, v. 423, p. 528–531, 2003.

KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; ZHU, Y.; CHELLIAH, M.;

EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOWIAK, J.; MO, K. C.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; LEETMAA, A.; REYNOLDS, R.; JENNE, R.; JOSEPH, D. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 77, n. 3, p. 437-471, 1996.

KERR, R. A. Storm-in-a-Box Forecasting. *Science*, v. 304, p. 946-948, 2004.

KILSBY, C. G.; TELLIER, S. S.; FOWLER, H. J.; HOWELS, T. R. Hydrological impacts of climate change on the Tejo and Guadiana Rivers. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 13, n. 3, p. 1175-1189, 2007.

KIM, J. W.; CHANG, J. T.; BEAKER, N. L.; WILKS, D. S.; GATES, W. L. The statistical problem of climate inversion: determination of the relationship between local and large-scale climate. *Monthly Weather Review*, v. 112, p. 2069-2077, 1984

KIMURA, R. Numerical weather prediction. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 90, p. 1403-1414, 2002.

KISTLER, R.; KALNAY, E.; COLLINS, W.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; KANAMITSU, M.; KOUSKY, V.; VAN DEN DOOL, H.; JENNE, R.; FIORINO, M. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 82, n. 2, p. 247-267, 2001.

LEDUC, M.; LAPRISE, R. Regional climate model sensitivity to domain size. *Climate Dynamics*, v. 32, p. 833-854, 2009.

LELIS, T. A. Modelagem do escoamento superficial e perda do solo na bacia do ribeirão São Bartolomeu, Zona da Mata de Minas Gerais, utilizando o simulador SWAT. 178 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

LEUNG, L. R.; QIAN, Y.; BIAN, X.; WASHINGTON, W. M.; HAN, J.; ROADS, J. O. Mid-century ensemble regional climate change scenarios for the Western United States. *Climatic Change*, v. 62, p. 75-113, 2004.

MACHADO, R. E. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 142 p., 2002.

MALAGÓN, D. C. El recurso suelo en Colombia – inventario y problemática. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, v. 22, n. 82, p. 13-52, 1998.

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L. M.; PESQUERO, J. F.; SOARES, W. R.; SANTOS, D. C.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, Sao Francisco and the Paraná River basins. *Climate Dynamics*, v.38, p.1829-1848, 2012.

MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. *Estudos Avançados*, v.22, n.63, p.83-96, 2008.

MARENGO, J. A. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. 2. ed. Brasília: MMA, 2007.

MARENGO, J. A.; CALVALCANTI, F.; SATYAMURTY, P.; TROSNIKOV, I.; NOBRE, C.; BONATTI, J.; CAMARGO, H.; SAMPAIO, G.; SANCHES, M.; MANZI, A.; CASTRO, C.; D'ALMEIDA, C.; PEZZI, L.; CANDIDO, L. Assessment of regional seasonal rainfall predictability using the CPTEC/COLA atmospheric GCM. *Climate Dynamics*, v. 21, p. 459-475, 2003.

MCGUFFIE, K.; HENDERSON-SELLER, A. Forty years of numerical climate modeling. *International Journal of Climatology*, v. 21, p. 1067-1109, 2001.

MERRITTS, D.; DE WET, A.; MENKING, K. Environmental geology: an Earth system science approach. W.H. Freeman & Company, New York, 1997. 452p. *apud* EEROLA, T. Mudanças climáticas globais: passado, presente, futuro. In: Fórum de ecologia, Florianópolis, 2003, 10 p. Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/mudancasclimaticas/proclima/file/publicacoes/impactos\\_vulnerabilidade/portugues/eerola\\_mc.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/mudancasclimaticas/proclima/file/publicacoes/impactos_vulnerabilidade/portugues/eerola_mc.pdf) >. Acesso em: 10 mar. 2012. EEROLA, T. Let it burn? More emissions for the debate on climate change. *Geologi*, n. 4-5, p. 124-127, 2003.

MESA, O. J.; POVEDA, G.; CARVAJAL, L. F. Introducción al clima de Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Minas, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Medellín, 390p., 1997.

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE DE COLOMBIA. Paramos – Programa para el manejo sostenible y restauración de ecosistemas de la alta montaña Colombiana. Bogotá, 2002. 71 p.

MISHRA, A.; KAR, S.; SINGH, V. P. Prioritizing structural management by quantifying the effect of land use and land cover on watershed runoff and sediment yield. *Water Resources Management*, v. 21, p. 1899-1913, 2007.

MÖLDERS, N.; RÜHAAK, W. On the impact of explicitly predicted runoff on the simulated atmospheric response to small-scale land-use changes—an integrated modeling approach. *Atmospheric Research*, v. 63, p. 3-38, 2002.

MOLION, L. C. B. Desmistificando o aquecimento global. *Intergeo*, v. 5, p. 13-20, 2007.

MORIASI, D. N.; WILSON, B. N.; DOUGLAS-MANKIN, K. R.; ARNOLD, J. G.; GOWDA, P. H. Hydrologic and water quality models: use, calibration, and validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*, v. 55, n. 4, p. 1241-1247, 2012.

NAKICENOVIC, N.; ALCAMO, J.; DAVIS, G.; DE VRIES, B.; FENHANN, J.; GAFFIN, S.; GREGORY, K.; GR, A.; JUNG, T. Y.; KRAM, T.; LA ROVERE, E. L.; MICHAELIS, L.; MORI, S.; MORITA, T.; PEPPER, W.; PITCHER, H.; PRICE, L.; RIAHI, K.; ROEHL, A.; ROGNER, H. H.; SANKOVSKI, A.; SCHLESINGER, M.; SHUKLA, P.; SMITH, S.; SWART, R.; VAN ROOIJEN, S.; VICTOR, N.; DADI, Z. *Special report on emissions scenarios*. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2000.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2005: Temple, TX, USA: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station. 2005, 476 p., 2005.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. Soil and water assessment tool – User’s manual. Version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406, Texas A&M University System, College Station. 618 p., 2011.

NORI, J.; URBINA-CARDONA, J. N.; LOYOLA, R. D.; LESCANO, J. N.; LEYNAUD, G. C. Climate change and American bullfrog invasion: what could we expect in South America?. PLoS ONE V.6, n.10, p.1-8, 2011: e25718. doi:10.1371/journal.pone.0025718.

O’BRIEN, T. A.; SLOAN, L. C.; SNYDER, M. A. Can ensembles of regional climate model simulations improve results from sensitivity studies? *Climate Dynamics*, v. 37, p. 1111-1118, 2011.

PABÓN, J. D. Escenarios de cambio climático para Colombia. En: Memorias del IV Encuentro de la Red de Universidades del Pacífico Sur (RUPSUR), 8-10 de noviembre, 2006.

PARRY, M. L.; CANZIANI, O. F.; PALUTIKOF, J. P.; VAN DER LINDEN, P. J.; HANSON, C. E. Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, 2007.

PECHLIVANIDIS, I. G.; JACKSON, B. M.; MCINTYRE, N. R.; WHEATER, H. S. Catchment scale hydrological modelling: a review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. *Global Nest Journal*, v. 13, n. 3, p. 193-214, 2011.

PIELKE, R. A.; WALCO, R. L.; STEYAERT, L. T.; VIDALE, P. L.; LISTON, G. E.; LYONS, W. A.; CHASE, T. N. The influence of anthropogenic landscape changes on weather in South Florida. *Monthly Weather Review*, v. 127, n. 7, p. 1663-1673, 1999.

PRUDHOMME, C.; REYNARD, N.; CROOKS, S. Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: Where are we now?. *Hydrological Processes*, v. 16, p. 1137-1150, 2002.

QUILBÉ, R.; ROUSSEAU, A. N.; MOQUET, J.-S.; SAVARY, S.; RICARD, S.; GARBOUJ, M. S. Hydrological responses of a watershed to historical land use evolution and future land use scenarios under climate change conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 12, p. 101-110, doi: 10.5194/hess-12-101, 2008.

REID, P. A.; JONES, P. D.; BROWN, O.; GOODESS, C. M.; DAVIES, T. D. Assessments of the reliability of NCEP circulation data and relationships with surface climate by direct comparisons with station based data. *Climate Research*, n.17, p. 247-261, 2001.

RITSCHARD, R. L.; CRUISE, J. F.; HATCH, L. U. Spatial and temporal analysis of agricultural water requirements in the Gulf Coast of the United States. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 35, n. 6, p. 1585-1596, 1999.

RODRIGUEZ, I. C. S. El ciclo hidrológico en la cuenca vertiente del pacifico colombiano: un estudio con una simulacion del clima a escala regional, 138 p., Tesis (Magister en Ciencias – Meteorología) – Universidad Nacional de Colombia – Bogotá, 2010.

ROJAS, M. Multiply nested regional climate simulation for Southern South America: sensitivity to model resolution. *Monthly Weather Review*, v. 134, n. 8, p. 2208-2223, 2006.

ROMANOWICZ, A. A.; VANCLOOSTER, M.; ROUNSEVELL, M.; LA JUNESSE, I. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: a case study in the Thyle catchment, Belgium. *Ecological Modelling*, n. 187, p. 27-39, 2005.

ROWELL, D. P. A demonstration of the uncertainty in projections of UK climate change resulting from regional model formulation. *Climatic Change*, 79 (3-4), p. 243-257, 2006.

RUMUKAINEN, M. *Methods of statistical downscaling of GCM simulations, SWECLIM report*. Norrköping: Rossby Centre, SMHI, 1997.

SALAZAR, L.; NOBRE, C.; OYAMA, M. Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. *Geophysical Research Letters*, v. 34, doi:10.1029/2007GLO29695, 2007.

SANTOS, L. L. Modelos hidráulicos-hidrológicos: conceitos e aplicações. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 2, n. 3, p. 1-19, 2009.

SCHMIDLI J.; FREI C.; VIDALE, P. L. Downscaling from GCM precipitation: a benchmark for dynamical and statistical downscaling methods. *International Journal of Climatology*, v. 26, n. 5, p.679-689, 2006.

SETH, A.; GIORGI, F. The effects of domain choice on summer precipitation simulation and sensitivity in a regional climate model. *Journal of Climate*, v. 11, p. 2698-2712, 1998.

SILVA, B. C. *Previsão hidroclimática de vazão para a bacia hidrográfica do rio São Francisco*. 2005. 227 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

SILVA, M. E. S.; GUETTER, A. K. Mudanças climáticas regionais observadas no estado do Paraná. *Revista Terra Livre*, São Paulo, v. 1, p. 111-126, 2003.

SOIL SURVEY STAFF. Soil Survey Manual. US. Dept. Agriculture, Agriculture Handbook 18, US. Government Printing Office, Washington, D. C. 1951, 503 p.

SOIL SURVEY STAFF. Soil Taxonomy. US. Dept. Agriculture, Agriculture Handbook 436, US. Government Printing Office, Washington, D.C. 1975, 753 p.

SOIL SURVEY STAFF. Keys to Soil Taxonomy. US. Dept. Agriculture, Agriculture Handbook, Seventh edition, US. Government Printing Office, Washington, D.C. 1996, 644 p.

SOLMAN, S. A.; PESSACG, N. L. Evaluating uncertainties in regional climate simulations over South America at the seasonal scale. *Climate Dynamics*, v. 39, p. 59-76, 2012.

SPIEGEL, M. R. Estatística. São Paulo: Makron Books/McGraw-Hill do Brasil, 1993 *apud* ALVES, L. M. Simulações da variabilidade do clima presente sobre a América do Sul utilizando um modelo climático regional. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, São Paulo, 2007.

STERN, N. *Stern review on the economics of climate change*, Executive Summary. HM Treasury, Londres, 2006.

STONE, M. C.; HOTCHKISS, R. H.; HUBBARD, C. M.; FONTAINE, T. A.; MEARNS, L. O.; ARNOLD, J. G. Impacts of climate change on Missouri River Basin water yield. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 37, n. 5, p. 1119-1130, 2001.

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, v. 456-457, p. 12-29, 2012.

TIBEBE, D.; BEWKET, W. Surface runoff and soil erosion estimation using the SWAT model in the Keleta Watershed, Ethiopia. *Land degradation & development*, v. 22, p. 551-564, 2011.

TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A.; CUARTAS, L. A.; FERREIRA, M.; FERREIRA, J. C.; MARENGO, J. A. Study of the climate change impacts on surface water resources and groundwater levels in the Tocantins river basin. CCST/INPE, 71 p., 2008.

TRENBERTH, K. E. Observations: surface and atmospheric climate change. In: SOLOMON, S. D. *et al.* (Ed.) *Climate change: The physical science basis*. Contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University, 2007.

TUCCI, C. E. M.; BRAGA, B. *Clima e recursos hídricos no Brasil*. 1. ed. Porto Alegre: ABRH, 348 p., 2003.

TUCCI, C. E. M. Modelos hidrológicos. 2 Edição. Porto Alegre: Editora da UFRGS. 678 p., 2005.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; COLLISCHONN, W.; DIAS, P. L. S.; SAMPAIO, G. O. Long term flow forecast based on climate and hydrological modeling: Uruguay river basin. *Water Resources Research*. v. 39, n.7, p.1-11, 2003.

UPPALA, S. M.; KALLBERG, P. W.; SIMMONS, A. J. ANDRAE, U.; DA COSTA BECHTOLD, V.; FIORINO, M.; GIBSON, J. K.; HASELER, J.; HERNANDEZ, A.; KELLY, G. A.; LI, X.; ONOGI, K.; SAARINEN, S.; SOKKA, N.; ALLAN, R. P.; ANDERSSON, E.; ARPE, K.; BALMASEDA, M. A.; BELJAARS, A. C. M.; VAN DE BERG, L.; BIDLOT, J.; BORMANN, N.; CAIRES, S.; CHEVALLIER, F.; DETHOF, A.; DRAGOSAVAC, M.; FISHER, M.; FUENTES, N.; HAGEMANN, S.; HÖLM, E.; HOSKINS, B. J.; ISAKSEN, L.; JANSSEN, P. A. E. M.; JENNE, R.; MCNALLY, A. P.; MAHFOUF, J. F.; MORCRETTE, J. J.; RAYNER, N. A.; SAUNDERS, R. W.; SIMON, P.; STERL, A.; TRENBERTH, K. E.; UNTCH, A.; VASILJEVIC, D.; VITERBO, P.; WOOLLEN, J. The ERA-40 reanalysis, *Quarterly Journal of the Meteorological Society Royal*, v. 131, n. 162, p. 2961-3012, 2005.

VALENCIA, S. M. Caracterización climática de la cuenca hidrográfica del río Desbaratado localizado entre los Departamentos del Cauca y Valle del Cauca Colombia, en un sistema de información geográfico, como material para la formulación de un plan de ordenación y manejo del río (Resumen). 2008. 12 p. Tesis (Master en Sistema de Información Geográfica) – Universitat Politècnica de Catalunya, Espanha, 2010.

VALÉRIO FILHO, M. Técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto aplicadas ao estudo integrado de bacias hidrográficas. In: Pereira, V. P.; Ferreira, M. E.; Cruz, M. C. P. (eds.). Solos altamente suscetíveis à erosão. Jaboticabal, FCAV/UNESP/SBCS. 1994. p. 223-242 *apud* MACHADO, R. E. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 142 p., 2002.

VAN GRIENSVEN, A.; MEIXNER, T.; GRUNWALD, S.; BISHOP, T.; DI LUZIO, M.; SRINIVASAN, R. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology*, v. 324, n. 1-4, p. 10-23, 2006.

VAN LIEW, M. W.; GARBRECHT, J. Hydrologic simulation of the Little Washita River experimental watershed using SWAT. *Journal of American Water Resources Association*, v. 39, n. 2, p. 413-426, 2003.

VARIS, O.; KAJANDER, T.; LEMMELA, R.. Climate and water: from climate models to water resources management and vice versa. *Climatic Change*, v. 66, p. 321-344, 2004.

VIALE, M. Análisis comparativo de los reanálisis ERA-40 y los reanálisis NCEP/NCAR sobre la región sur de Sudamérica. 2005. 81p. Tesis (para optar al título de licenciado en Ciencias de la Atmósfera) – Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, 2005.

VINCENT, L. A.; PETERSON, T. C.; BARROS, V. R.; MARINO, M. B.; RUSTICUCCI, M.; CARRASCO, G.; RAMIREZ, E.; ALVES, L. M.; AMRIZZI, T.; BERLATO, M. A.; GRIMM, A. M.; MARENGO, J. A.; MOLION, L.; MONCUNILL, D. F.; REBELLO, E.; ANUNCIAÇÃO, Y. M. T.; QUINTANA, J.; SANTOS, J. L.; BAEZ, J.; CORONEL, G.; GARCIA, J.; TREBEJO, I.; BIDEGAIM, M.; HAYLOCK, M. R.; KAROLY, D. Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960–2000, *American Meteorological Society*, v. 18, pp. 5011-5023, 2005.

VON STORCH, H.; ZORITA, E.; CUBASCH, U. Downscaling of climate change estimates to regional scales: an application to Iberian rainfall in wintertime. *Journal of Climate*, v. 6, n. 6, p. 1161-1171, 1993.

WANG, Z.; FICKLIN, D. L.; ZHANG, Y.; ZHANG, M. Impact of climate change on streamflow in the arid Shiyang River Basin of northwest China. *Hydrological Processes*, v. 26, p. 2733-2744, 2012.

WATSON, R. T.; ZINYOWERA, M. C.; MOSS, H.; DOKKEN, D. J. Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, New York, New York. 1996.

WIGLEY, T. M. L.; JONES, P. D.; BRIFFA, K. R.; SMITH, G. Obtaining sub-gridscale information from coarse-resolution general circulation model output. *Journal of Geophysical Research*, n. 95 1943-53, 1990 *apud* XU, C. Y. From GCMs to river flow: a review of downscaling methods and hydrologic modeling approaches. *Progress in Physical Geography*, v. 23, n. 2, p. 229-249, 1999.

WILBY, R. L.; DAWSON, C. W.; BARROW, E. M. SDSM – a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, v. 17, p. 147-159, 2002.

WILBY, R. L.; HAY, L. E.; LEAVESLEY, G. H. A comparison of downscaled and raw GCM output: implications for climate change scenarios in the San Juan River basin, Colorado. *Journal of Hydrology*, v. 225, p. 67-91, 1999.

WILBY, R. L.; WIGLEY, T. M. L. Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography*, v. 21, n. 4, p. 530-548, 1997.

WILKS, D. S. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. San Diego: Academic Press, 259 p., 1995 *apud* ALVES, L. M. Simulações da variabilidade do clima presente sobre a América do Sul utilizando um modelo climático regional. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, São Paulo, 2007.

WOOD, A. W.; MAURER, E. P.; KUMAR, A.; LETTENMAIER, D. P. Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. *Journal of Geophysical Research*, v. 107, n. 20, p. 1-15, 2002.

WOOD, A. W.; LETTENMAIER, D. P.; PALMER, R. N. Assessing climate change implications for water resources planning. *Climatic Change*, v. 37, p. 203-228, 1997.

WU, L.; LON, T.; LIU, X.; GUO, J. Impacts of climate and land-use change on the migration of non-point source nitrogen and phosphorus during rainfall-runoff in the Jialing River Watershed, China. *Journal of Hydrology*, v. 475, p. 26-41, 2012a.

WU, Y.; LIU, S.; ABDUL-AZIS, O. I. Hydrological effects of the increased CO<sub>2</sub> and climate change in the Upper Mississippi River Basin using a modified SWAT. *Climatic Change*, v. 110, p. 977-1003, 2012b.

XU, C. Y. From GCMs to river flow: a review of downscaling methods and hydrologic modelling approaches. *Progress in Physical Geography*, 23(2), 229–249, 1999.

YU, Z.; LAKHTAKIA, M. N.; YARNAL, B.; WHITE, R. A.; MILLER, D. A.; FRAKES, B.; BARRON, E. J.; DUFFY, C.; SCHWARTZ, F. W. Simulating the river-basin response to atmospheric forcing by linking a mesoscale meteorological model and hydrologic model system. *Journal of Hydrology*, v. 218, n. 1-2 p. 72-91, 1999.

ZENG, X.; ZHOA, M.; SU, B.; TANG, J.; ZHENG, Y.; GUI, Q.; ZHOU, Z. Simulations of a hydrological model as coupled to a regional climate model. *Advances in Atmospheric Sciences*, v. 20, n. 2, p. 227-236, 2003.

ZHANG, N.; HE, H. M.; ZHANG, S. F.; JIANG, X. H.; XIA, Z. Q.; HUANG, F. Influence of reservoir operation in the upper reaches of the Yangtze River (China) on the inflow and outflow regime of the TGR-based on the improved SWAT model. *Water Resources Management*, n. 3, v. 26, p. 691-705, 2012.

ZHANG, H.; HUANG, G. H.; WANG, D.; ZHANG, X. Uncertainty assessment of climate change impacts on the hydrology small prairie wetlands. *Journal of Hydrology*, n. 396, p. 94-103, 2011.

ZHANG, X.; SRINIVASAN, R.; BOSCH, D. Calibration and uncertainty analysis of the SWAT model using Genetic Algorithms and Bayesian Model Averaging. *Journal of Hydrology*, v. 374, p. 307-317, 2009.

ZORITA, E.; VON STORCH, H. The analog method as a simple statistical downscaling technique: comparison with more complicated methods. *Journal of Climate*, v. 12, p. 2474-2498, 1999.

## ***APÊNDICES***

## **APÉNDICE A – Script em GrADS (*Grid Analysis and Display System*) para transformar as variáveis do formato PP para o formato ASCII**

```
# INGENIERO GUILLERMO EDUARDO ARMENTA  
# UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA - CORTOLIMA  
# SCRIPT PARA EXTRAER DATOS DIARIOS DEL Precip y PASARLOS A ASCII  
# USO: run gddNCEPVHct.gs variable anyo mes
```

```
function gddA1B8810(arg)
```

```
variab=subwrd(arg,1)  
anyo=subwrd(arg,2)  
mes=subwrd(arg,3)
```

```
# Variables del script
```

```
i=1  
j=1  
equis=284  
ye=5
```

```
n.1="ene"  
n.2="feb"  
n.3="mar"  
n.4="abr"  
n.5="may"  
n.6="jun"  
n.7="jul"  
n.8="ago"  
n.9="sep"  
n.10="oct"  
n.11="nov"  
n.12="dic"
```

```
m.1="Enero"  
m.2="Febrero"  
m.3="Marzo"  
m.4="Abril"  
m.5="Mayo"  
m.6="Junio"  
m.7="Julio"  
m.8="Agosto"  
m.9="Septiembre"  
m.10="Octubre"  
m.11="Noviembre"  
m.12="Diciembre"
```

```
vald.1="NULL"  
vald.2="NULL"  
vald.3="NULL"  
vald.4="NULL"  
vald.5="NULL"  
vald.6="NULL"  
vald.7="NULL"  
vald.8="NULL"  
vald.9="NULL"
```

```

vald.10="NULL"
vald.11="NULL"
vald.12="NULL"
vald.13="NULL"
vald.14="NULL"
vald.15="NULL"
vald.16="NULL"
vald.17="NULL"
vald.18="NULL"
vald.19="NULL"
vald.20="NULL"
vald.21="NULL"
vald.22="NULL"
vald.23="NULL"
vald.24="NULL"
vald.25="NULL"
vald.26="NULL"
vald.27="NULL"
vald.28="NULL"
vald.29="NULL"
vald.30="NULL"
vald.31="NULL"

```

```

factnull=""
factpres="/100"
facttemp="-273"
factprec="*3600*24"

```

# colocar el factor de conversión correspondiente

```

if(variab=00024 | variab = "00024.max" | variab = "00024.min" | variab=08225)

```

```

  fact=facttemp

```

```

else

```

```

  if(variab=00001)

```

```

    fact=factpres

```

```

  else

```

```

    if(variab=03296 | variab=03297 | variab=04203 | variab=05216 | variab=08234 | variab=08235)

```

```

      fact=factprec

```

```

    else

```

```

      fact=factnull

```

```

    endif

```

```

  endif

```

```

endif

```

```

'reinit'

```

```

say ' '

```

```

say '----'

```

```

say 'Generando datos para ' m.mes ' de ' anyo '. Variable: ' variab

```

```

say '----'

```

```

say ' '

```

```

rc = write ('PrecisA1BQ0Sul-'%variab'-'%anyo'-'%m.mes'-Diarios.txt','Latitud  Longitud          1          2
           3          4          5          6          7          8          9          10         11         12         13         14
           15         16         17         18         19         20         21         22         23         24         25         26
           27         28         29         30         31')

```

```

while (ye>3.5)

```

```

  while (equis<285.5)

```

```

    if (variab = "00024.max" | variab = "00024.min")

```

```

      'open

```

```

        /home/precis/Guillermo/Datos/A1B-Q0-1988-
        2010/'%variab'/precisA1BSul.dd'%anyo'%"n.mes'.00024.ctf'

```

```

      else

```

```

/open /home/precis/Guillermo/Datos/A1B-Q0-1988-
2010/%variab'/precisA1BSul.dd'%anyo'%n.mes'.'%variab'.ctl'
endif
'q file'
val = sublin(result,5)
dias = subwrđ(val,12)
tiempos=dias+1
'set LON '%equis
val = sublin(result,1)
longitud = subwrđ(val,4)
'set LAT '%ye
val = sublin(result,1)
latitud = subwrđ(val,4)
while (j<tiempos)
'set t '%j
if (variab = "00024.max" | variab = "00024.min")
'd s00024'%fact"
val = sublin(result,1)
valđ.j = subwrđ(val,4)
else
'd s'%variab"%fact"
val = sublin(result,1)
valđ.j = subwrđ(val,4)
endif
j=j+1
endwhile
j=1
rc = write ('PrecisA1BQ0Sul-'%variab'-'%anyo'-'%m.mes'-Diarios.txt','%latitud' '%longitud-360'
'%valđ.1' '%valđ.2' '%valđ.3' '%valđ.4' '%valđ.5' '%valđ.6'
'%valđ.7' '%valđ.8' '%valđ.9' '%valđ.10' '%valđ.11' '%valđ.12'
'%valđ.13' '%valđ.14' '%valđ.15' '%valđ.16' '%valđ.17' '%valđ.18'
'%valđ.19' '%valđ.20' '%valđ.21' '%valđ.22' '%valđ.23' '%valđ.24'
'%valđ.25' '%valđ.26' '%valđ.27' '%valđ.28' '%valđ.29' '%valđ.30'
'%valđ.31")
equis=equis+0.22
while (j<31)
valđ.j = "NULL"
j=j+1
endwhile
j=1
endwhile
ye=ye-0.22
equis=284
endwhile
'reinit'

```

## **APÉNDICE B – Script em GrADS (*Grid Analysis and Display System*) para extrair dados diários da rodada do modelo PRECIS para o período A1B, período 1988-2010**

```
# ING. GUILLERMO EDUARDO ARMENTA
# UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA - CORTOLIMA
# PROGRAMA PARA OBTENER DATOS DIARIOS DEL Precis PARA EL ESCENARIO A1B

'reinit'

# Variables del script
pvok=0

# Impresion del menu
say '-----'
say 'Script para extraer los datos diarios de la corrida del modelo Precis bajo el escenario A1B 1988-2010.'
say 'Desarrollado por el Ingeniero Guillermo Eduardo Armenta - 2010'
say 'Departamento de Geografia - Universidad Nacional de Colombia/Cortolima'
say '-----'

while (pvok != 1)
  say '-----'
  say 'Lista de Variables'
  say '-----'
  say 'Codigo      Nombre de la variable      Unidades'
  say '-----'
  say '00001      SURFACE PRESSURE      HPa'
  say '00024      SURFACE TEMPERATURE      Celsius'
  say '00025      BOUNDARY LAYER (=BL)      DEPTH'
  say '01201      NET DOWN SURFACE SW FLUX      Wm-2'
  say '03225      WIND U-COMPONENT AT 10 METRES (WIND GRID)      ms-1'
  say '03226      WIND V-COMPONENT AT 10 METRES (WIND GRID)      ms-1'
  say '03234      SURFACE LATENT HEAT FLUX      Wm-2'
  say '03245      RELATIVE HUMIDITY AT 1.5 METRES      %'
  say '03296      EVAPORATION FROM SOIL SURFACE      kg m-2s-1'
  say '03297      EVAPORATION FROM CANOPY RATE      kg m-2s-1'
  say '04203      LARGE SCALE RAINFALL RATE      kg m-2s-1'
  say '05216      TOTAL PRECIPITATION RATE      kg m-2s-1'
  say '08208      SOIL MOISTURE CONTENT IN ROOT ZONE      kg m-2'
  say '08234      SURFACE RUNOFF RATE      kg m-2s-1'
  say '08235      SUB-SURFACE RUNOFF RATE      kg m-2s-1'
  say ' '
  prompt 'Ingrese el codigo de la variable (Incluyendo los ceros): '
  pull pv
  if (pv=00001 | pv=00024 | pv=00025 | pv=01201 | pv=03225 | pv=03226 | pv=03234 | pv=03245 | pv=03296 |
  pv=03297 | pv=04203 | pv=05216 | pv=08208 | pv=08234 | pv=08235)
    pvok=1
  else
    say 'El codigo dado no es valido.'
    say 'Ingrese un codigo que se encuentre dentro de la lista de variables.'
  endif
endwhile

if (pv=00024)
  pvok=0
  while (pvok != 1)
    say ' '
    say '-----'
    say 'Temperatura:'
```

```

say ' '
say '1. Media'
say '2. Máxima'
say '3. Mínima'
prompt 'Ingrese el tipo de temperatura a extraer: '
pull pvt
if (pvt>4 | pvt<0)
  say 'Tipo de temperatura ingresado no válido.'
  say 'Ingrese un tipo de temperatura de la lista.'
else
  pvok=1
endif
endwhile
if (pvt=1)
  pv=00024
else
  if (pvt=2)
    pv=00024.max
  else
    pv=00024.min
  endif
endif
endif

pvok=0
while (pvok != 1)
  say ' '
  say '-----'
  say 'Ingrese la coordenada de longitud del punto del cual desea extraer los datos:'
  say '(Entre -77.96 y -72.46)'
  pull longit
  if (longit>-72.46 | longit<-77.96)
    say 'La coordenada de longitud no es valida.'
  else
    pvok=1
  endif
endif
endwhile

pvok=0
while (pvok != 1)
  say ' '
  say '-----'
  say 'Ingrese la coordenada de latitud del punto del cual desea extraer los datos:'
  say '(Entre 1.78 y 7.693)'
  pull latit
  if (latit>7.693 | latit<1.78)
    say 'La coordenada de latitud no es valida.'
  else
    pvok=1
  endif
endif
endwhile

say ' '
say 'Procesando datos para la variable 'pv'. Por favor espere...'
say ' '

equis=360+longit
ye=latit

n.1="ene"

```

n.2="feb"  
n.3="mar"  
n.4="abr"  
n.5="may"  
n.6="jun"  
n.7="jul"  
n.8="ago"  
n.9="sep"  
n.10="oct"  
n.11="nov"  
n.12="dic"

m.1="Enero"  
m.2="Febrero"  
m.3="Marzo"  
m.4="Abril"  
m.5="Mayo"  
m.6="Junio"  
m.7="Julio"  
m.8="Agosto"  
m.9="Septiembre"  
m.10="Octubre"  
m.11="Noviembre"  
m.12="Diciembre"

vald.1="NULL"  
vald.2="NULL"  
vald.3="NULL"  
vald.4="NULL"  
vald.5="NULL"  
vald.6="NULL"  
vald.7="NULL"  
vald.8="NULL"  
vald.9="NULL"  
vald.10="NULL"  
vald.11="NULL"  
vald.12="NULL"  
vald.13="NULL"  
vald.14="NULL"  
vald.15="NULL"  
vald.16="NULL"  
vald.17="NULL"  
vald.18="NULL"  
vald.19="NULL"  
vald.20="NULL"  
vald.21="NULL"  
vald.22="NULL"  
vald.23="NULL"  
vald.24="NULL"  
vald.25="NULL"  
vald.26="NULL"  
vald.27="NULL"  
vald.28="NULL"  
vald.29="NULL"  
vald.30="NULL"  
vald.31="NULL"

factnull=""  
factpres="/100"  
facttemp="-273"

```

factprec="*3600*24"
i=1988
j=1

# colocar el factor de conversión correspondiente
if(pv=00024 | pv = "00024.max" | pv = "00024.min" | pv=08225)
  fact=facttemp
else
  if(pv=00001)
    fact=factpres
  else
    if(pv=03296 | pv=03297 | pv=04203 | pv=05216 | pv=08234 | pv=08235)
      fact=factprec
    else
      fact=factnull
    endif
  endif
endif
rc = write ('PrecisA1BQ0Sul-'%pv-'(%longit';%latit')-Diarios.txt','Anyo      Mes      1      2      3
           4      5      6      7      8      9      10     11     12     13     14     15
           16     17     18     19     20     21     22     23     24     25     26     27
           28     29     30     31')
while (i<2011)
  while (j<13)
    k=1
    say '----'
    say 'Generando datos para ' m.j ' de ' i '. Variable: ' pv
    say '----'
    if (pv = "00024.max" | pv = "00024.min")
      'open /home/precis/Guillermo/Datos/A1B-Q0-1988-2010/'%pv'/precisA1BSul.dd'%i"%n.j'.00024.ctl'
    else
      'open /home/precis/Guillermo/Datos/A1B-Q0-1988-2010/'%pv'/precisA1BSul.dd'%i"%n.j'.%pv'.ctl'
    endif
    'q file'
    val = sublin(result,5)
    dias = subwrd(val,12)
    tiempos=dias+1
    'set LON '%equis
    val = sublin(result,1)
    longitud = subwrd(val,4)
    'set LAT '%ye
    val = sublin(result,1)
    latitud = subwrd(val,4)
    while (k<tiempos)
      'set t '%k
      if (pv = "00024.max" | pv = "00024.min")
        'd s00024'%fact"
        val = sublin(result,1)
        vald.k = subwrd(val,4)
      else
        'd s'%pv"%fact"
        val = sublin(result,1)
        vald.k = subwrd(val,4)
      endif
      k=k+1
    endwhile
    k=1
    rc = write ('PrecisA1BQ0Sul-'%pv-'(%longit';%latit')-Diarios.txt','%i      '%m.j'  '%vald.1'
              '%vald.2'  '%vald.3'  '%vald.4'  '%vald.5'  '%vald.6'  '%vald.7'
              '%vald.8'  '%vald.9'  '%vald.10' '%vald.11' '%vald.12' '%vald.13'

```

```

        '% vald.14'      '% vald.15'      '% vald.16'      '% vald.17'      '% vald.18'      '% vald.19'
        '% vald.20'      '% vald.21'      '% vald.22'      '% vald.23'      '% vald.24'      '% vald.25'
        '% vald.26'      '% vald.27'      '% vald.28'      '% vald.29'      '% vald.30'      '% vald.31")
while (k<31)
  vald.k = "NULL"
  k=k+1
endwhile
k=1
'close 1'
j=j+1
endwhile
i=i+1
j=1
endwhile

say ' '
say '----'
say 'Procesamiento de datos finalizado.'
say 'Los datos se encuentran en la carpeta /home/precis/Guillermo'
return

```

### APÊNDICE 3 – Características físicas dos solos da bacia hidrográfica do rio Coello exigidas pelo modelo SWAT

SNAM	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	TEXTURE	SQL_Z	SOL_BD	SOL_AWC	SOL_K	SQL_CBN	CLAY	SILT	SAND	ROCK	SOL_ALB	USLE_K
<b>MDAd</b>	7	B	0 - 420	0.40	Sal	420	1.09	0.13	129.28	3.9	4	29	67	30	0.24	0.140
			420 - 540		LSa	540	1.50	0.04	172.97	0.3	2	4	94	20	0.24	0.109
			450 - 660		SaL	660	1.43	0.07	107.98	1.4	4	14	82	0	0.24	0.132
			660-1000		SaL	1000	0.99	0.12	149.33	4.7	4	22	74	0	0.24	0.141
			1000-1190		sal	1190	1.23	0.12	107.56	2.8	4	30	66	0	0.24	0.131
			1190-1250		lsa	1250	1.38	0.05	149.82	1.5	2	6	92	0	0.24	0.131
			1250-1700		sal	1700	0.97	0.12	174.69	6	2	23	75	0	0.24	0.131
<b>MDAe</b>	2	B	0 - 220	0.43	LSa	220	0.98	0.11	177.3	7.6	2	20	78	0	0.20	0.119
			220 - 370		SaL	370	1.15	0.11	123.71	3.5	4	26	70	0	0.20	0.137
<b>MDAg</b>	3	B	0 - 280	0.58	LSa	280	1.00	0.12	150.18	10	4	22	74	0	0.22	0.128
			280 - 600		LSa	600	1.00	0.12	150.18	9	4	22	74	0	0.22	0.128
			600 - 800		LSa	800	1.08	0.11	137.93	4.1	4	22	74	0	0.22	0.128

SNAM	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	TEXTURE	SQL_Z	SOL_BD	SOL_AWC	SOL_K	SQL_CBN	CLAY	SILT	SAND	ROCK	SOL_ALB	USLE_K
<b>MDBf</b>	1	B	0 -160	0.47	SaL	160	1.03	0.12	128.25	10	6	24	70	0	0.23	0.133
<b>MGAf</b>	4	B	0 - 180	0.50	SaL	180	1.04	0.13	108.29	10	8	24	68	0	0.20	0.133
			180 - 350		Lsa	350	1.02	0.11	151.86	8.9	4	18	78	0	0.20	0.115
			350 - 820		Lsa	820	1.06	0.09	173.08	4.3	2	14	84	0	0.20	0.093
			820-1300		Sa	1300	1.46	0.04	156.90	0.7	2	4	94	0	0.20	0.077
<b>MGAf1</b>	4	B	0 - 180	0.50	SaL	180	1.04	0.13	108.29	10	8	24	68	0	0.16	0.133
			180 - 350		Lsa	350	1.02	0.11	151.86	8.9	4	18	78	0	0.16	0.115
			350 - 820		Lsa	820	1.06	0.09	173.08	4.3	2	14	84	0	0.16	0.093
			820-1300		Sa	1300	1.46	0.04	156.90	0.7	2	4	94	0	0.16	0.077
<b>MGAg1</b>	4	B	0 -180	0.63	SaL	180	0.98	0.15	125.43	10	6	32	62	0	0.21	0.133
			180 - 340		Lsa	350	0.93	0.15	168.13	10.8	2	34	64	0	0.21	0.115
			340 - 760		Lsa	820	0.94	0.14	169.45	6.8	2	32	66	0	0.21	0.093
			760-1500		Sa	1300	0.96	0.12	173.38	5.6	2	26	72	0	0.21	0.077
<b>MGBg</b>	1	B	0 - 300	0.46	Sal	300	1	0.14	126.39	15.2	6	28	66	0	0.20	0.138

SNAM	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	TEXTURE	SQL_Z	SOL_BD	SOL_AWC	SOL_K	SQL_CBN	CLAY	SILT	SAND	ROCK	SOL_ALB	USLE_K
<b>MGCd</b>	4	B	0 -300	0.41	Sal	300	0.98	0.09	93.45	5.11	4	26	70	0	0.20	0.137
			300-1050		Sal	1050	0.95	0.10	81.89	3.6	4	34	62	0	0.20	0.144
			1050-1450		Sal	1450	1.30	0.10	48.72	2.31	4	32	64	0	0.20	0.143
			1450-1800		Sal	1800	0.98	0.07	72.48	8.3	4	28	68	0	0.20	0.139
<b>MGCe</b>	4	B	0 - 300	0.41	Sal	300	0.98	0.13	148.47	5.1	4	26	70	0	0.20	0.137
			300-1050		Sal	1050	0.95	0.15	145.03	3.6	4	34	62	0	0.20	0.144
			1050-1450		Sal	1450	1.30	0.11	95.68	2.3	4	32	64	0	0.20	0.143
			1450-1800		Sal	1800	0.98	0.13	147.62	8.3	4	28	68	0	0.20	0.139
<b>MGCe1</b>	4	B	0 - 300	0.41	Sal	300	0.98	0.13	148.47	5.1	4	26	70	0	0.20	0.137
			300-1050		Sal	1050	0.95	0.15	145.03	3.6	4	34	62	0	0.20	0.144
			1050-1450		Sal	1450	1.30	0.11	95.68	2.3	4	32	64	0	0.20	0.143
			1450-1800		Sal	1800	0.98	0.13	147.62	8.3	4	28	68	0	0.20	0.139
<b>MKBf1</b>	4	B	0 - 200	0.46	SaL	200	1.05	0.14	91.98	10	10	26	64	0	0.19	0.134
			200- 480		SaL	480	0.99	0.20	88.94	4.1	8	24	64	0	0.19	0.133
			480-1000		LSa	1000	1.21	0.09	123.06	3.14	4	20	76	0	0.19	0.123
			1000-1500		LSa	1500	1.31	0.08	116.16	2.36	4	16	80	0	0.19	0.108

SNAM	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	TEXTURE	SQL_Z	SOL_BD	SOL_AWC	SOL_K	SQL_CBN	CLAY	SILT	SAND	ROCK	SOL_ALB	USLE_K
<b>MKGc</b>	5	B	0 - 250	0.42	SaL	250	0.94	0.09	73.85	6.95	4	36	60	0	0.21	0.144
			250 - 530		SaL	530	0.97	0.09	93.45	4.38	4	38	58	0	0.21	0.145
			530 - 800		SaL	800	1.25	0.10	81.89	2.58	4	38	58	0	0.21	0.145
			800 - 1230		SaL	1230	1.31	0.10	48.72	2.13	2	38	60	0	0.21	0.148
			1230 - 1540		SaL	1540	1.80	0.07	72.48	1.78	4	36	60	0	0.21	0.150
<b>MKGd</b>	5	B	0 - 250	0.42	SaL	250	0.94	0.15	144.16	6.95	4	36	60	0	0.21	0.144
			250 - 530		SaL	530	0.97	0.15	137.4	4.38	4	38	58	0	0.21	0.145
			530 - 800		SaL	800	1.25	0.13	94.74	2.58	4	38	58	0	0.21	0.145
			800 - 1230		SaL	1230	1.31	0.12	102.81	2.13	2	38	60	0	0.21	0.148
			1230 - 1540		SaL	1540	1.80	0.12	81.72	1.78	4	36	60	0	0.21	0.150
<b>MKGe1</b>	5	B	0 - 250	0.42	SaL	250	0.94	0.15	144.16	6.95	4	36	60	0	0.18	0.144
			250 - 530		SaL	530	0.97	0.15	137.4	4.38	4	38	58	0	0.18	0.145
			530 - 800		SaL	800	1.25	0.13	94.74	2.58	4	38	58	0	0.18	0.145
			800 - 1230		SaL	1230	1.31	0.12	102.81	2.13	2	38	60	0	0.18	0.148
			1230 - 1540		SaL	1540	1.80	0.12	81.72	1.78	4	36	60	0	0.18	0.150

SNAM	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	TEXTURE	SQL_Z	SOL_BD	SOL_AWC	SOL_K	SQL_CBN	CLAY	SILT	SAND	ROCK	SOL_ALB	USLE_K
<b>MKIb</b>	5	B	0 - 300	0.34	SaL	300	1.18	0.14	117.29	2.96	4	38	58	0	0.20	0.145
			300 - 600		SaL	600	1.47	0.09	71.19	1.19	6	26	68	0	0.20	0.159
			600 - 930		Sa	930	1.52	0.02	86.44	0.08	2	2	96	60	0.20	0.072
			930- 1050		SaL	1050	1.48	0.05	38.63	1.02	8	26	66	65	0.20	0.165
			1050-1900		Sa	1900	1.53	0.02	84.48	0.08	2	4	94	70	0.20	0.079
<b>MKIbp</b>	5	B	0 - 300	0.39	SaL	300	1.18	0.14	117.29	2.96	4	38	58	0	0.19	0.145
			300 - 600		SaL	600	1.47	0.09	71.19	1.19	6	26	68	0	0.19	0.159
			600 - 930		Sa	930	1.52	0.02	86.44	0.08	2	2	96	60	0.19	0.072
			930-1050		SaL	1050	1.48	0.05	38.63	1.02	8	26	66	65	0.19	0.165
			1050-1900		Sa	1900	1.53	0.02	84.48	0.08	2	4	94	70	0.19	0.079
<b>MQCf1</b>	4	B	0 - 250	0.40	SaL	250	1.20	0.12	74.29	3.5	10	26	64	0	0.20	0.134
			250 - 400		SaL	400	1.42	0.12	34.05	1.5	14	30	56	0	0.20	0.144
			400 - 670		SaL	670	1.59	0.09	29.09	0.4	14	20	66	0	0.20	0.165
			670 - 1200		SaL	1200	1.62	0.08	30.25	0.1	14	16	70	0	0.20	0.157
<b>MQDf1</b>	3	B	0 - 170	0.40	LSa	170	1.46	0.06	89.32	1.2	6	12	82	30	0.19	0.109
			170 - 340		LSa	340	1.54	0.06	102.52	0.3	4	14	82	40	0.19	0.130
			340- 1500		Sa	1500	1.53	0.04	211.2	0.1	2	4	94	60	0.19	0.079

SNAM	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	TEXTURE	SQL_Z	SOL_BD	SOL_AWC	SOL_K	SQL_CBN	CLAY	SILT	SAND	ROCK	SOL_ALB	USLE_K
<b>MQDg1</b>	2	B	0 - 200	0.39	SaL	200	1.39	0.10	90.84	1.68	12	20	68	0	0.20	0.132
			200 - 300		SaL	350	1.52	0.04	90.84	0.94	10	14	76	40	0.20	0.137
<b>MQEf2</b>	2	B	0 - 180	0.39	SaL	180	1.45	0.10	31.48	1.78	16	20	64	0	0.21	0.128
			180-1200		SaL	1200	1.60	0.08	24.09	0.34	16	18	66	0	0.21	0.160
<b>MQEg2</b>	3	C	0 - 250	0.50	CL	250	1.29	0.13	4.16	3.09	42	28	30	0	0.20	0.115
			250-1000		SaL	1000	1.28	0.13	3.47	0.97	52	32	16	0	0.20	0.152
			1000-1500		L	1500	1.38	0.15	3.80	0.75	38	44	18	0	0.20	0.178
<b>MQHe1</b>	2	B	0 - 100	0.39	SaL	100	1.45	0.07	13.64	1.7	18	22	60	35	0.18	0.130
			100 - 230		SaCL	230	1.55	0.04	13.64	0.74	22	22	56	85	0.18	0.156
<b>MQJg1</b>	4	B	0 - 200	0.40	L	200	1.26	0.09	13.8	3.03	20	36	44	40	0.20	0.132
			200 - 310		L	310	1.51	0.07	9.29	0.94	16	34	50	45	0.20	0.166
			310 - 700		L	700	1.59	0.06	6.31	0.27	16	36	48	60	0.20	0.178
			700 - 1150		CL	1150	1.49	0.06	9.8	0.62	34	26	40	80	0.20	0.152
<b>MQObp</b>	3	C	0 - 180	0.49	SiC	180	1.34	0.14	1.43	0.3	46	40	14	0	0.20	0.186
			180 - 750		C	750	1.24	0.13	1.80	0.6	54	38	8	0	0.20	0.214
			750 - 1000		C	1000	1.29	0.13	1.68	0.8	50	36	14	0	0.20	0.170

SNAM	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	TEXTURE	SQL_Z	SOL_BD	SOL_AWC	SOL_K	SQL_CBN	CLAY	SILT	SAND	ROCK	SOL_ALB	USLE_K
<b>MWaf2</b>	3	C	0 - 300	0.40	SaLC	300	1.53	0.05	3.3	1.09	27	13	60	50	0.20	0.151
			300 - 960		SaLC	960	1.51	0.06	1.66	0.94	32	18	50	60	0.20	0.144
			960 - 1200		SaLC	1200	1.56	0.06	1.69	0.22	30	21	49	80	0.20	0.162
<b>MWaf3</b>	3	C	0 - 300	0.40	SaLC	300	1.53	0.05	3.3	1.09	27	13	60	50	0.21	0.151
			300 - 960		SaLC	960	1.51	0.06	1.66	0.94	32	18	50	60	0.21	0.144
			960 - 1200		SaLC	1200	1.56	0.06	1.69	0.22	30	21	49	80	0.21	0.162
<b>MWAg3</b>	3	C	0 - 300	0.40	SaLC	300	1.53	0.05	3.3	1.09	27	13	60	50	0.22	0.151
			300 - 960		SaLC	960	1.51	0.06	3.3	0.94	32	18	50	60	0.22	0.144
			960 - 1200		SaLC	1200	1.56	0.06	3.3	0.22	30	21	49	80	0.22	0.162
<b>MWCe3</b>	1	B	50	0.39	SaL	50	1.38	0.08	24.29	2.45	16	18	66	25	0.22	0.122
<b>MWDg2</b>	2	B	0 - 180	0.39	Lsa	180	1.56	0.06	58.52	0.42	6	18	76	15	0.20	0.157
			180 - 750		SaL	750	1.59	0.05	46.51	0.21	6	20	74	25	0.20	0.166
<b>MWId2</b>	1	B	200	0.41	CL	200	1.57	0.14	5.36	0.13	28	38	34	0	0.19	0.170
<b>MWle2</b>	1	B	200	0.41	CL	200	1.57	0.14	5.36	0.13	28	38	34	0	0.21	0.170

SNAM	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	TEXTURE	SQL_Z	SOL_BD	SOL_AWC	SOL_K	SQL_CBN	CLAY	SILT	SAND	ROCK	SOL_ALB	USLE_K
<b>MWJc1</b>	3	B	0 - 260	0.40	SaCL	260	1.38	0.09	7.67	2.34	26	28	48	30	0.21	0.124
			260 - 560		L	560	1.45	0.07	5.98	1.52	24	28	48	40	0.21	0.134
			560 - 1150		SaL	1150	1.54	0.04	22.00	0.74	8	24	68	70	0.21	0.171
<b>MWJd2</b>	3	B	0 - 150	0.39	SaL	150	1.41	0.08	22.57	1.94	14	26	60	30	0.21	0.134
			150 - 450		CL	450	1.47	0.12	21	0.68	38	22	40	0	0.21	0.144
			450 - 1000		C	1000	1.41	0.13	21.79	0.2	44	28	28	0	0.21	0.152
<b>PWDb1</b>	4	B	0 - 220	0.39	SaL	220	1.5	0.11	20.08	1.22	18	28	54	0	0.19	0.150
			220 - 430		SaL	430	1.33	0.13	25.64	2.81	20	26	54	0	0.19	0.126
			430 - 550		CL	550	1.5	0.12	22.86	0.48	36	20	44	0	0.19	0.145
			550 - 1200		SaCL	1200	1.54	0.12	22.86	0.48	26	20	54	0	0.19	0.154
<b>PWFa</b>	4	B	0 - 220	0.38	SaL	220	1.56	0.07	21.41	0.62	14	22	64	20	0.19	0.166
			220 - 460		SaL	460	1.59	0.08	23.9	0.47	16	16	68	5	0.19	0.155
			460 - 660		SaL	660	1.59	0.05	22.7	0.27	20	22	58	50	0.19	0.163
			660 - 1200		SaL	1200	1.62	0.04	15.69	0.13	10	24	66	50	0.19	0.176
<b>PWFb1</b>	2	B	0 - 150	0.38	SaL	150	1.52	0.06	25.44	0.94	10	24	66	35	0.21	0.164
			150 - 350		Sa	350	1.54	0.04	125.95	0.07	2	10	88	20	0.21	0.102

SNAM	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	TEXTURE	SQL_Z	SOL_BD	SOL_AWC	SOL_K	SQL_CBN	CLAY	SILT	SAND	ROCK	SOL_ALB	USLE_K
<b>PWHc2</b>	3	B	0 - 120	0.38	SaL	120	1.59	0.11	40.53	0.34	8	34	58	0	0.20	0.186
			120 - 820		C	820	1.37	0.13	35	0.48	46	30	24	0	0.20	0.153
			820 - 1500		SaCL	1500	1.60	0.10	37.8	0.07	26	20	54	0	0.20	0.155
<b>PWKa</b>	5	B	0 - 120	0.38	L	120	1.41	0.13	28.29	0.47	18	34	48	0	0.21	0.174
			120 - 400		CL	400	1.41	0.13	12.1	0.1	28	28	44	0	0.21	0.162
			400 - 800		CL	800	1.38	0.14	20.20	0.15	30	32	38	0	0.21	0.164
			800 - 1000		SaCL	1000	1.45	0.10	22.03	0.15	24	12	64	0	0.21	0.141
			1000 - 1400		CL	1400	1.37	0.14	20.7	0.17	32	32	36	0	0.21	0.163
<b>PWLap</b>	4	B	0 - 200	0.41	L	200	1.37	0.15	13.42	1.9	24	38	38	0	0.20	0.133
			200 - 450		SiL	450	1.3	0.17	14.01	2.09	24	52	24	0	0.20	0.146
			450 - 1100		SIC	1100	1.33	0.14	13.72	0.8	44	40	16	0	0.20	0.173
			1100 - 1300		C	1300	1.33	0.13	13.72	0.41	48	36	16	0	0.20	0.179
<b>PWLb</b>	3	B	0 - 200	0.38	SaL	200	1.47	0.06	25.34	1.47	12	18	70	35	0.21	0.150
			200 - 950		Sa	950	1.52	0.03	122.52	0.05	2	4	94	30	0.21	0.079
			950 - 1500		Sa	1500	1.48	0.02	73.93	0.5	1	1	98	40	0.21	0.075

SNAM	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	TEXTURE	SQL_Z	SOL_BD	SOL_AWC	SOL_K	SQL_CBN	CLAY	SILT	SAND	ROCK	SOL_ALB	USLE_K
			0 - 200		SaL	200	1.47	0.06	25.34	1.47	12	18	70	35	0.21	0.150
<b>PWLbp</b>	3	B	200 - 950	0.38	Sa	950	1.52	0.03	122.52	0.05	2	4	94	30	0.21	0.079
			950 - 1500		Sa	1500	1.48	0.02	80.69	0.5	1	1	98	40	0.21	0.075
			0 - 300		SaL	300	1.53	0.09	39.83	0.87	2	20	68	0	0.21	0.178
<b>VWAa</b>	3	B	300 - 900	0.39	LSa	900	1.62	0.07	39.38	0.13	2	14	74	0	0.21	0.173
			900 - 1500		LSa	1500	1.62	0.06	40.93	0.07	2	12	76	0	0.21	0.165