



**PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA
SECRETARIA DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS**



PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO

PROJETO BRA/06/032

ENQUADRAMENTO PNUD: R.1 P1.17

Carta de Acordo nº 25647/2014 (RC) – SAE – FCPC

Adaptação às Mudanças do Clima: Cenários e Alternativas – Recursos
Hídricos

Produto 1 - Metodologia e Sistematização da Base de Dados

Responsável:

Brasília, 27 de agosto de 2014

SUMÁRIO

1. ANTECEDENTES	3
2. OBJETIVOS E PRODUTOS ESPERADOS	4
2.1. Produto 1	4
2.2. Produto 2	5
2.3. Produto 3	5
2.4. Produto 4	5
3. METODOLOGIA DE TRABALHO.....	6
4. CRONOGRAMA FÍSICO DE ATIVIDADES	31
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

1. Antecedentes

O Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, na sigla em inglês) aponta que a mudança do clima impõe uma grande ameaça ao desenvolvimento sustentável, por afetar de forma direta e indireta grande parte da população, sua saúde, os recursos hídricos, a infraestrutura urbana e rural, as zonas costeiras, as florestas e a biodiversidade, bem como os setores econômicos – como agricultura, pesca, produção florestal, geração de energia, indústrias – além das cadeias destes setores. O IPCC aponta impactos de grande magnitude sobre a América do Sul, em especial sobre recursos hídricos e setores econômicos relacionados, impondo ao governo brasileiro a necessidade de formular e implementar medidas de adaptação, com vistas a gerenciar riscos climáticos e responder de forma tempestiva aos prováveis impactos decorrente da mudança global do clima. Desta forma, torna-se fundamental a elaboração de subsídios ao planejamento nacional de longo prazo que incorpore a mudança do clima.

O projeto “BRASIL 3 TEMPOS” BRA/06/032, executado pela Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República (SAE/PR), tem como objetivo desenvolver estratégias e ações nacionais que subsidiem o governo na formulação e implementação de políticas públicas de longo prazo que promovam o crescimento econômico do país, acompanhado de inclusão social. Essas ações serão realizadas por meio de estudos, produtos e eventos sobre temas de grande importância para o planejamento estratégico brasileiro. Para tanto, este Termo de Referência foca no tema da Adaptação às Mudanças Climáticas.

A matriz energética brasileira é basicamente constituída por energias consideradas limpas, principalmente provenientes de hidroelétricas. A hegemonia da hidroeletricidade na matriz de energia elétrica brasileira impõe cautelosa análise sobre o regime fluvial e seus padrões de variação temporal, tendo em vista o significativo impacto que estas variações podem produzir na oferta de energia, e conseqüentemente, em toda a economia nacional (ALVES et al., 2013).

Diante disso, existe uma demanda pelo Estado e pelas empresas privadas por informações climáticas para tomada de decisão ao nível regional/local de médio e longo prazo. Informações de variabilidade e mudanças climáticas de qualidade podem tornar o planejamento energético mais eficaz e minimizar os potenciais impactos sobre a disponibilidade deste recurso (BANCO MUNDIAL, 2010).

As mudanças e variabilidade climáticas têm sido alvo de discussões e pesquisas científicas em todo mundo com vistas ao entendimento de sua ocorrência (IPCC, 2007(a); NOBRE, 2005; SILVEIRA et al.,2013; SILVEIRA et al.,2012;;MARENGO e SOARES et al., 2005; MARENGO e VALVERDE, 2007). O Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) é o principal órgão científico internacional para as avaliações das alterações climáticas, e foi criado pelo Programa das Nações Unidas para o Ambiente (PNUA) e pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM) em 1988, para fornecer visões científicas claras sobre o estado atual do conhecimento das mudanças climáticas e seus possíveis impactos socioeconômicos e ambientais (IPCC).

2. Objetivos e produtos esperados

A SAE/PR, por intermédio da Subsecretaria de Desenvolvimento Sustentável (SSDS), objetiva, de modo geral, desenvolver uma avaliação dos prováveis impactos de diferentes cenários climáticos para o Brasil sobre os recursos hídricos, usos associados, atual e futuro, considerando um horizonte de 30 anos (2010-2040).

2.1. Produto 1

- Organização de toda a base de dados, observações do século XX e projeções dos modelos.
- Estudo da base conceitual dos produtos, definição da estratégia metodológica empregada.
- Avaliação das precipitações dos modelos atmosféricos de mudanças climáticas.

Com isso:

Espera-se selecionar a base de dados que será utilizada como referência para as demais etapas do projeto;

Espera-se identificar se o modelo possui habilidade em representar os padrões de variação do clima no século XX.

2.2. Produto 2

- Análise das variáveis meteorológicas a ser utilizada como variáveis de entrada no modelo hidrológico: precipitação, temperatura média, temperatura mínima, temperatura máxima e amplitude térmica.
 - Cálculo de anomalias e tendências das variáveis meteorológicas para o século XXI;
- Calibração dos parâmetros do modelo hidrológico para as bacias do SIN.
- Estimativa dos parâmetros das regressões dos postos que não utilizam o modelo hidrológico.
- Análise do impacto das mudanças climáticas nas variáveis hidrológicas: evapotranspiração potencial e vazão.
- Cálculo de anomalias e tendências das variáveis hidrológicas para o século XXI.

Com isso:

Espera-se criar uma metodologia que possa agregar todo o SIN.

Espera-se identificar tendência e possíveis mudanças nos regimes anuais e sazonais das variáveis em análise.

Espera-se identificar tendência e possíveis mudanças nos regimes anuais e sazonais das variáveis do ciclo hidrológico no Brasil.

2.3. Produto 3

- Simulação hidrológica considerando o uso atual/projetado sobre o recurso hídrico pelo setor elétrico a partir das bacias hidrográficas incrementais aos reservatórios do ONS a partir do cenário futuro de disponibilidade hídrica gerado.

Com isso:

Espera-se identificar regiões de maior escassez e vulnerabilidade no Brasil.

2.4. Produto 4

- Elaboração de um portfólio de orientações gerais para o planejamento e gestão dos recursos hídricos considerando os cenários de disponibilidade hídrica gerados.

3. Metodologia de trabalho

A metodologia divide-se, basicamente, em cinco grandes etapas, conforme Figura 1. Os modelos globais são avaliados quanto à representação dos padrões de variação do clima no século XX e os horizontes futuros projetados para os parâmetros. A segunda etapa consiste na obtenção das precipitações médias (absolutos ou variações em relação ao passado) dos modelos para as bacias do setor elétrico brasileiro, para posterior correção estatística para remoção de viés usando a função de distribuição gama. Em seguida obtêm-se as evapotranspirações a partir dos modelos do IPCC-AR5, usando o método de *Penman-Motheith* modificado. Já na quarta etapa obtêm-se as vazões usando o modelo hidrológico SMAP, tendo como dados de entrada as evapotranspirações e precipitações corrigidas. A quinta etapa consiste em avaliar os resultados das projeções utilizando algumas métricas, medidas de tendência e ondeletas. Desta forma, é possível quantificar a sensibilidade da oferta à variabilidade e (às) mudanças climáticas.

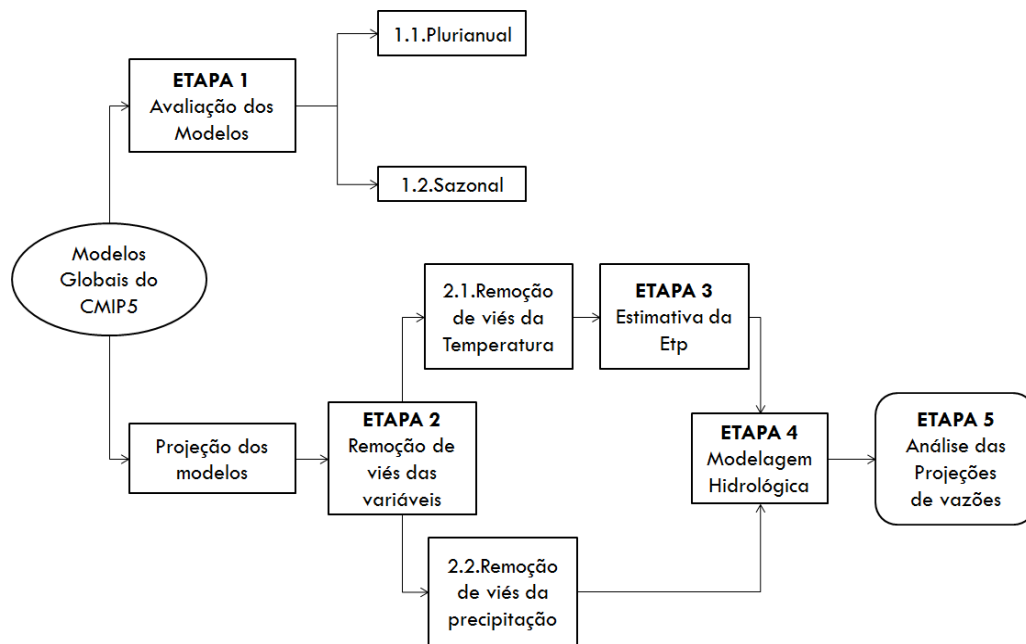


Figura 1-Síntese da metodologia a ser utilizada no trabalho.

3.1. Região de estudo - Sistema Interligado Nacional (SIN)

O Sistema Interligado Nacional (SIN) responde pela produção e transmissão de energia elétrica do Brasil. É um sistema hidrotérmico de grande porte com predominância de usinas hidroelétricas, onde apenas 3,4% da capacidade de produção

de eletricidade do país encontram-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica (ONS, 2011).

O ONS (Operador Nacional de Sistemas) trata os aproveitamentos hidroelétricos do SIN como posto fictício nos seguintes casos: reservatórios de acumulação de usinas hidroelétricas, usinas a fio d'água, grupo de usinas agregadas, usinas considerando suas bacias hidrográficas de forma integral ou parcial, usinas com bacias hidrográficas sob influência de reservatórios a montante ou entrada/saída de vazões pontuais. Os postos fictícios podem ser também usinas planejadas ou em construção para verificação do seu comportamento individual e inserida no Sistema. Desta forma, verifica-se que um mesmo aproveitamento hidroelétrico pode conter mais de um posto fictício, utilizado com objetivo de representar diferentes configurações e/ou critérios de operação e planejamento do Sistema. Todos os postos fictícios possuem uma série de VNA (Vazões Naturalizadas), até o fim de 2010 o SIN contava com 206 postos fictícios de acordo com ONS (2011).

Para geração de vazões de curto e médio prazo, geralmente utilizam-se modelos hidrológicos do tipo chuva-deflúvio, com passo de tempo diário, para as primeiras semanas, agregados aos modelos de previsão estocástica semanais, tornando esta etapa, segundo a ONS, bastante onerosa e praticamente inviável na aplicação a todos os aproveitamentos hidroelétricos. A partir das metodologias e/ou critérios utilizados na previsão de vazões, e levando em consideração a estrutura correlacional das VNA's para os postos fictícios, o ONS adotou a realização de previsão de vazões para um subconjunto de aproveitamentos hidroelétricos considerados representativos das diferentes bacias, denominados de Postos Base (PB's). No restante dos postos fictícios, as vazões são previstas através de regressões lineares mensais a partir dos dados previstos nos PB's, complementando assim as previsões de vazões em todo o SIN. O ONS trabalha atualmente com um número total de 88 PB's representativos dos diversos regimes hidrográficos regionais encontrados em território brasileiro. Neste trabalho serão utilizados como dados amostrais mensais os 88 PB's. Esses PB's são relacionados na Tabela 1 e sua distribuição espacial é apresentada na Figura 2. Este trabalho estimará a partir dos modelos de mudança climática a vazão afluente da área não controlada para os 88 postos base. Conforme a metodologia descrita no item 3.7. Os demais postos do conjunto dos 195 de interesse deste projeto terão as vazões estimadas para os diferentes cenários dos modelos climáticos a partir de regionalização hidrológica das vazões dos cenários dos referidos postos base

Tabela 1-Postos Bases. Os valores entre parênteses representam os indicadores de postos fictícios do ONS. Fonte: Alexandre (2012).

Identificador		Nome do Posto Base	Identificador		Nome do Posto Base
PB	ONS		PB	ONS	
1	1	Camargos (1)	45	254	Pedra do Cavalo (254)
2	6	Furnas (6)	46	168	Sobradinho Incremental (168)
3	14	Caconde (14)	47	259	Itiquira I e II (259)
4	17	Marimbondo (17)	48	278	Manso (278)
5	18	Água Vermelha (18)	49	281	Ponte de Pedra (281)
6	24	Emborcação (24)	50	295	Jauru (295)
7	25	Nova Ponte (25)	51	296	Guaporé (296)
8	31	Itumbiara (31)	52	190	Boa Esperança (190)
9	32	Cachoeira Dourada (32)	53	191	Cana Brava (191)
10	33	São Simão (33)	54	253	São Salvador (253)
11	34	Ilha Solteira (34)	55	257	Peixe Angical (257)
12	99	Espora (99)	56	270	Serra da Mesa (270)
13	117	Guarapiranga (117)	57	271	Estreito Tocantins (271)
14	119	Billings + Pedras (119)	58	273	Lajeado (273)
15	120	Jaguari (120)	59	275	Tucuruí (275)
16	121	Paraibuna (121)	60	145	Rondon II (145)
17	155	Retiro Baixo (155)	61	277	Curuá-Una (277)
18	156	Três Marias (156)	62	279	Samuel (279)
19	158	Queimado (158)	63	287	Santo Antonio (287)
20	160	Alto Tietê (160)	64	291	Dardanelos (291)
21	164	Edgard de Souza S/Tribut. (164)	65	266	Itaipu (266)
22	205	Corumbá IV (205)	66	246	Porto Primavera (246)
23	206	Miranda (206)	67	47	A.A. Laydner (47) – Jurumirim
24	209	Corumbá I (209)	68	61	Capivara (61)
25	211	Funil-Grande (211)	69	63	Rosana (63)
26	237	Barra Bonita (237)	70	115	Gov. Parigot de Souza (115)
27	240	Promissão (240)	71	71	Santa Clara PR (71)
28	242	Nova Avanhandava (242)	72	72	Fundão (72)
29	243	Três Irmãos (243)	73	73	Desvio Jordão (73) – Natural
30	245	Jupia (245)	74	74	Foz Do Areia (74)
31	247	Caçu (247)	75	76	Segredo (76)
32	251	Serra do Facão (251)	76	77	Salto Santiago (77)
33	294	Salto (294)	77	78	Salto Osório (78)
34	125	Sta. Cecília (125)	78	92	Ita (92)
35	130	Ilha dos Pombos (130)	79	93	Passo Fundo (93)
36	134	Salto Grande (134)	80	94	Foz do Chapecó (94)
37	144	Mascarenhas (144)	81	98	Castro Alves (98)
38	149	Candongá (149)	82	101	Salto Pilão (101)
39	188	Itapebí (188)	83	102	São José (102)
40	196	Rosal (196)	84	111	Passo Real (111)
41	197	Picada (197)	85	215	Barra Grande (215)
42	201	Tocos (201)	86	216	Campos Novos (216)
43	255	Irapé (255)	87	220	Monjolinho (220)
44	283	Santa Clara MG (283)	88	286	Quebra Queixo (286)



Figura 2-Distribuição espacial dos Postos Base. Fonte: Alexandre (2012)

3.2. Base de Dados

Os dados hidrometeorológicos históricos foram reunidos a partir de informações de pluviômetros (precipitação, em mm), de estações fluviométricas (vazão, em m^3/s) e de estações meteorológicas (temperatura média do ar, em $^{\circ}C$; insolação, em horas; umidade relativa do ar, em %).

Essas informações serão obtidas na escala de tempo diária, a partir da base de dados da Agência Nacional das Águas (ANA) para o caso dos pluviômetros e das estações fluviométricas, e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o caso das estações meteorológicas.

Além disso, dados mensais de precipitação (em mm), temperatura média, máxima e mínima do ar (em $^{\circ}C$) serão obtidas a partir da base do *Climate Research Unit* (CRU TS3.21, www.cru.uea.ac.uk/data). O CRU TS3.21 disponibiliza esses dados em alta resolução com uma grade regular de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$ para um período que se estende de 1901 até 2012.

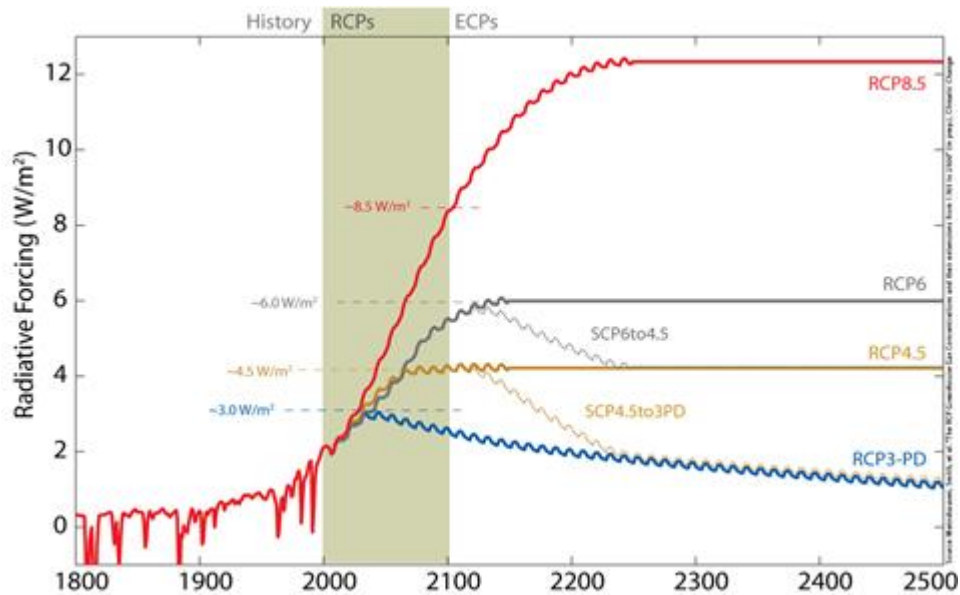
Os cenários de mudanças climáticas a serem utilizados são os produzidos pelo modelo regional ETA forçados por modelos globais operacionalizados pelo INPE, melhores detalhados no item seguinte.

Essa fase encerra-se com a verificação da disponibilidade das variáveis dos modelos do CMIP5 necessárias para a entrada no método de estimativa de evapotranspiração potencial e entrada no modelo hidrológico.

3.3. Modelos globais do CMIP5

Os dados provenientes do IPCC são resultados de simulações de modelos globais de vários centros de pesquisa que contribuem para a confecção do relatório do IPCC-AR5. As simulações são forçadas pelas concentrações observadas de gases de efeito estufa durante o século XX e por uma concentração estimada para o século XXI.

Como parte da fase preparatória para o desenvolvimento dos novos cenários para o AR5, foram criados os chamados RCPs (*Representative Concentration Pathways*), que servem como entrada para modelagem climática e química atmosférica nos experimentos numéricos do CMIP5. Os RCPs recebem seus nomes a partir dos níveis das forçantes radiativas, conforme relatado por cada equipe de modelagem elaboradora de cada RCP. Assim, RCP-X implica em um cenário no qual a forçante radiativa de estabilização ou de pico ou ao final do século XXI corresponde a $X \text{ W.m}^{-2}$. Na Figura 3, é mostrado o comportamento dos principais cenários do IPCC-AR5: RCP8.5, RCP6, RCP4.5 e RCP3-PD. Neste trabalho serão usados os cenários RCP4.5 e RCP8.5 para análise das projeções do século XXI dos modelos operacionalizados e disponibilizados pelo INPE em parceria com a SAE/PR.



Fonte: [http:// www.pik-postdam.de/~mmtalde/rcps/](http://www.pik-postdam.de/~mmtalde/rcps/)

Figura 3- Cenários do IPCC-AR5 e forçante radiativa antropogênica global para cada um deles.

3.4. ETAPA 1: Avaliação dos modelos

Dado o grande número de modelos e as projeções tão divergentes para algumas variáveis meteorológicas fornecidas pelos modelos globais do CMIP5 é imprescindível uma metodologia de avaliação que seja capaz de identificar os modelos que representam adequadamente o clima nas principais regiões do Brasil para que possa ser dimensionada e tratada à incerteza associada às projeções do conjunto de modelos.

Em busca de identificar se os modelos representam os padrões de variação do século XX será adotada a avaliação sazonal proposta por Silveira et al. (2012) e uma adaptação da avaliação pluriannual proposta por Lázaro (2011), conforme Figura 4.

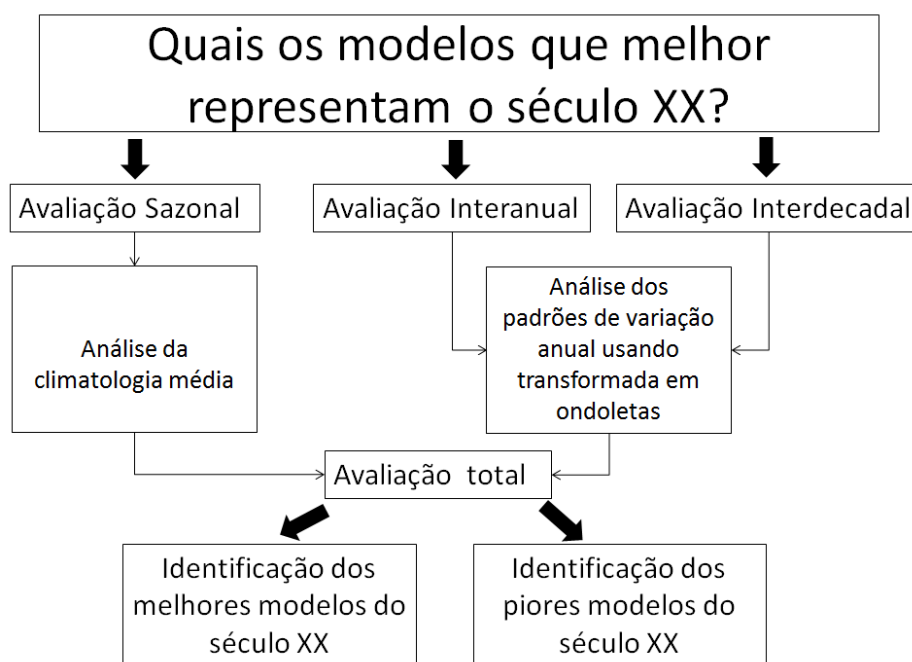


Figura 4- Representação esquemática da avaliação sugerida.

A avaliação é constituída por três etapas que analisam padrões de variação de diferentes escalas: sazonal, interanual e interdecadal.

Para avaliação sazonal (AVALS) dos modelos será calculada a climatologia mensal média sobre a região de estudo para todos os modelos do IPCC e a observação (CRU continente e NOAA oceano). Em seguida será feita uma comparação com base em alguns índices estatísticos para que possam ser definidos que modelos possuem melhor comportamento para América do Sul.

As avaliações interanual (AVALa) e interdecadal (AVALd) baseiam-se na transformada de ondas de ondas (TORRENCE e COMPO, 1998), sobretudo na comparação do espectro global de variação das séries observadas e modeladas.

Cada uma das avaliações possui valores entre zero e 1, que representam, respectivamente, o pior modelo para todos os índices daquela análise e o melhor. Depois de calculado AVALS, AVALa e AVALd de todos os modelos é sugerido um índice geral, AVALt, conforme equações 1 e 2. Este é dado pelo somatório das avaliações, ponderados por um valor γ_j (que possui valores entre zero e 1).

A ponderação pode ser feita de acordo com os interesses do avaliador: ao atribuir valores iguais para γ_j todas as avaliações possuem o mesmo peso no índice geral, enquanto ao atribuir valores diferentes as três avaliações possuirão pesos distintos na análise geral.

A avaliação geral dos modelos do IPCC-AR5 segue o modelo hierárquico das equações 1 e 2:

$$AVAL_y = \sum_{j=1} \gamma_j \cdot AVAL_j \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^{j=N} \gamma_j = 1 \quad (2)$$

3.4.1. ETAPA 1.1: Critérios de Avaliação do Desempenho dos modelos do IPCC quanto à representação da Climatologia Média (Avaliação Sazonal)

A representação da sazonalidade é de grande relevância para a avaliação dos impactos do clima em recursos hídricos e agricultura. O início do plantio das culturas e o regime fluvial são condicionados pela distribuição temporal das chuvas. Uma má representação desta sazonalidade compromete a avaliação dos impactos das mudanças climáticas sobre estas duas importantes áreas. Adicionalmente pode-se avaliar que os totais de precipitações mensais e sua sazonalidade são considerados como indicativo da qualidade que o modelo tem de representar os sistemas geradores de chuvas e sua ocorrência.

A avaliação sazonal (AVALs) dos modelos é baseada na comparação entre a climatologia mensal média sobre a região de estudo para todos os modelos do IPCC e a observação (CRU continente e NOAA oceano).

As medidas estatísticas utilizadas, cujas definições estão indicadas a seguir, são: raiz do erro quadrático médio da contribuição percentual mensal em relação às chuvas anuais (RMSE_PC) e correlação (CORREL) (WILKS, 1995).

A raiz do erro quadrático médio percentual (RMSE_PC) é a raiz quadrada da média das diferenças individuais quadráticas entre a contribuição percentual mensal das chuvas modeladas nos totais anuais e a contribuição percentual mensal das chuvas observadas nos totais anuais e é definida pela equação:

$$RMSE_{PC} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{100P_i}{\sum_{j=1}^n P_j} - \frac{100A_i}{\sum_{j=1}^n A_j} \right)^2}, \quad (3)$$

onde n são os meses, P é projeção de cada mês e A a análise considerada como observação.

Valores grandes do RMSE_PC representam grandes erros nos campos projetados, e valores próximos de zero indicam projeções quase perfeita. Elevando ao quadrado o termo da diferença, o RMSE_PC tende a dar maior peso às grandes discrepâncias entre os campos observados e previstos.

A correlação (equação 4) pode assumir valores entre -1 e 1 que indicam, respectivamente, perfeita anticorrelação e perfeita correlação, havendo ainda a total ausência de correlação verificada com um resultado igual a zero. Este índice tem a capacidade de detectar correspondência de fase entre as séries, sendo, por construção, insensível a erros de viés.

$$CORREL = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (A_i - \bar{A})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^{i=n} (A_i - \bar{A})^2}} \quad (4)$$

Ao final do cálculo desses dois índices é feita uma avaliação ponderada para que os modelos possam ser classificados, dada por:

$$AVAL_s = \alpha_c \left(\frac{CORREL - CORREL_{MIN}}{CORREL_{MAX} - CORREL_{MIN}} \right) + \alpha_r \left(\frac{RMSE_PC_{MAX} - RMSE_PC}{RMSE_PC_{MAX} - RMSE_PC_{MIN}} \right) \quad (5),$$

tal que

$$\alpha_c + \alpha_r = 1. \quad (6)$$

Sendo, CORRELMIN a menor correlação obtida entre os modelos do IPCC e CORRELMAX a máxima correlação. Assim como, RMSE_PC_MAX é o máximo erro quadrático médio percentual dos modelos do IPCC e RMSE_PC_MIN o mínimo.

As variáveis α_c e α_r assumem valores entre 0 e 1 (conforme equação 6). Para $\alpha_c > \alpha_r$, a correlação exerce maior influência na avaliação do modelo, enquanto que para $\alpha_r > \alpha_c$ o RMSE_PC dos modelos possui maior peso na avaliação. Já para $\alpha_r = \alpha_c = 0,5$, as duas métricas utilizadas neste trabalho exercem o mesmo efeito sobre o valor de AVAL.

A variável AVALs assume valores entre 0 e 1 que indicam, respectivamente, o pior entre os modelos avaliados e o melhor deles, segundo este critério.

3.4.2. ETAPA 1.2: Critérios de Avaliação do Desempenho dos modelos do IPCC quanto à representação da variabilidade interanual e interdecadal.

Segundo Wilks (1995), entre outros, existem duas formas fundamentais de análise de séries temporais quanto à variabilidade interanual e interdecadal: análises no domínio do tempo e no domínio de frequência. A primeira busca caracterizar a série de dados considerando o mesmo domínio em que os dados foram coletados/observados. Já as análises no domínio de frequência buscam a representação da série temporal em termos da contribuição de cada escala temporal para um dado valor.

Diante da dificuldade em se caracterizar as variabilidades tanto de espaço como de tempo no padrão de chuvas, torna-se necessário utilizar um método de análise adequado na localização temporal das estruturas de multiescalas. O método usado neste estudo para caracterizar as variabilidades tanto no espaço como no tempo é a Transformada em Ondeletas (TO). Este método é recomendado para o estudo de fenômenos transientes, espacialmente heterogêneos e que atuam simultaneamente em várias escalas do escoamento (TORRENCE e COMPO, 1998).

Transformada em ondoletas

As ondeletas são funções matemáticas que caracterizam os padrões de variação de uma série de dados, em diferentes componentes de frequência, permitindo a análise de cada componente em sua escala correspondente. A análise da ondeleta mantém a localização do tempo e da frequência, em uma análise de sinal, pela decomposição ou transformação de uma série temporal unidimensional numa série difusa de tempo e frequência, simultaneamente. Assim, é possível obter informações da amplitude de quaisquer sinais periódicos dentro da série, bem como informações de como esta amplitude varia com o tempo.

Segundo Torrence e Compo (1998), a transformada em ondeletas tem se tornado um método bastante comum na análise de picos localizados de variância ou potência em uma série temporal. Por meio da decomposição desta série temporal em diferentes espaços de tempo e frequência é possível determinar picos de potência em diferentes frequências e períodos. Esta transformada tem sido recomendada para alguns eventos em detrimento da transformada de Fourier (ROCHA, 2008).

Ao utilizar série de Fourier para transformar um dado sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, perde-se totalmente a informação sobre a localização temporal. Além disso, a partir da transformada de Fourier de um sinal, é impossível dizer onde um evento em particular está localizado, pois o que é obtido são as frequências que compõem o sinal. Isto faz com que a aplicação da Análise de Fourier se restrinja às séries com comportamento estacionário, ou ainda em problemas lineares ou funções periódicas.

A transformada contínua de ondeleta (TCO) é definida em termos de uma integral do produto da série analisada $f(t)$ e uma ondeleta conhecida como “ondeleta-mãe” $\psi_{a,b}(t)$, expressa pela equação 7:

$$TCO(a,b) = \psi(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\psi_{a,b}(t)dt \quad (7)$$

em que os parâmetros a e b variam continuamente em \mathbb{R} , com $a \neq 0$, e

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a \in \mathbb{R}^+ \text{ e } b \in \mathbb{R} \quad (8)$$

Sendo as funções ondeletas filhas geradas a partir de dilatações e translações da ondeleta-mãe $\psi_{a,b}(t)$. Na equação 8 os parâmetros a e b , correspondem, respectivamente, as informações de escala e translação.

A função ondeleta considerada para a análise foi a de Morlet, dada pela equação 9. Esta pertence à família de ondeletas complexas não-ortogonais e é definida pela equação 9:

$$\psi(\eta) = \pi^{-1/4} e^{iw_0\eta} e^{-\eta^2/2} \quad (9)$$

sendo $w_0 = 6$ e $\eta = t/s$

onde t é o tempo e s é a escala da ondeleta e w_0 é uma frequência não dimensional, que representa uma onda modulada por um envelope Gaussiano($e^{-\eta^2/2}$). Maiores detalhes podem ser encontrados em Bogges e Narcowich (2009), Ruch e Fleet (2009) e Torrence e Compo (1998).

Para identificar as frequências de variação mais significativas de uma série temporal pode-se utilizar a potência do sinal do Especto Global da Ondeleta. A potência está associada da intensidade do sinal da série história para uma dada frequência ou banda (intervalo) de frequências. A potência é o valor absoluto (norma da parte real e imaginária da ondeleta) ao quadrado dos valores da transformada da ondeleta da série

temporal para cada frequência em determinado instante de tempo (TORRENCE; COMPO, 1998). Este procedimento, conhecido na literatura científica pelo termo em inglês de Global Wavelet Spectrum (Espectro de Ondeleta Global), é uma forma similar do espectro de energia obtido via Transformada Rápida de Fourier.

No espectro de energia global é possível identificar exatamente as bandas (frequências) características presentes na série analisada. Esta representação possui um caráter muito vantajoso e utilitário que é a localização no tempo da variabilidade da energia de uma série temporal. Maiores informações a respeito podem ser encontrados em Boggess e Narcowich (2009), Ruch e Fleet (2009) e Torrence e Compo (1998).

A transformada contínua de ondeletas envolve um enorme número de escalas o que gera um volume grande de dados. Uma estratégia computacionalmente mais eficiente é a escolha de apenas um subconjunto de escalas e posições para os quais os coeficientes devem ser calculados. Adotando-se essa estratégia, a transformada de ondeletas deixa de ser contínua para ser discreta. Este análise permite que um sinal seja representado como uma soma das componentes.

$$f(t) = \sum_{i=1}^n W_i \quad (10)$$

i é o número de componentes e W_i a ondeleta que representa a componente i .

Critérios de Avaliação

Utiliza-se como critério de avaliação plurianual a representação da série de dados observacionais de 1961 a 2000 da precipitação, através do espectro de energia global dos totais de precipitações anuais. A avaliação plurianual é dividida em duas: avaliação interanual e avaliação interdecadal.

Para avaliação dos modelos é calculada o espectro de energia global sobre as regiões de estudo para todas as rodadas dos modelos do IPCC e as observações. Em seguida são identificados os principais padrões de variação das séries observadas a partir do Espectro Global da Ondeleta e a partir disto são executadas as seguintes etapas:

- decomposição do sinal para obter os coeficientes *wavelets* no domínio transformado. Para o caso da série observada de precipitação nas três regiões avaliadas a

decomposição será igual à soma das bandas características no século XX e o resíduo. A partir da equação 11, tem-se:

$$P(t) = R + \sum_{i=1}^n B_i \quad (11)$$

$P(t)$ é a série de precipitação média anual observada;

R é o resíduo;

i é o número de bandas utilizadas;

B_i é a ondeleta que representa a banda i .

Sendo a primeira banda do espectro observado será considerada variação interanual e as demais regiões do espectro serão consideradas variação interdecadal.

- análise e processamento dos coeficientes neste domínio;
- reconstrução do sinal a partir dos coeficientes modificados.

O processo de reconstrução será repetido para os modelos do IPCC-AR4 para as mesmas bandas observadas. Em seguida, é feita uma comparação com base em alguns índices estatísticos para que possam ser definidos que modelos possuem melhor desempenho para a região de estudo.

As medidas estatísticas utilizadas, cujas definições estão indicadas a seguir, são: correlação entre a reconstituição da série do modelo e da observação para uma dada banda de frequência (CORREL) e a distância da variabilidade das variâncias das rodadas dos modelos (DIST).

Sendo as frações entre a variância espectral da banda e a variância do espectro global da série da chuva anual f_P e f_A , tais que

$$f_P = \frac{VP_s}{VP_G}$$

$$f_A = \frac{VA_s}{VA_G} \quad (12)$$

onde VP_s é a variância da projeção de precipitação na região da banda de interesse e VP_G a variância de todo o espectro global de potência da série modelada. Onde VA_s é a variância da análise na região significativa e a VA_G a variância do espectro global de ondeletas da observação.

A distância euclidiana DIST indica a variabilidade das variâncias das rodadas dos modelos quanto às variâncias dos dados observados por bandas e é definida pela Equação 13:

$$DIST^2 = \sum_{i=1}^n (f_{p_i} - f_{a_i})^2 \quad (13)$$

i é o número de bandas avaliado.

Valores grandes de DIST indicam uma distância maior entre as variâncias dos modelos quanto à variância da série observada. Isto implica que o modelo possui dificuldade de representar a variabilidade da banda.

Para avaliação interanual é usada a correlação entre o espectro observado e modelado no período que vai do início do espectro ao fim da primeira banda associado ao índice DIST da primeira banda. Enquanto para avaliação interdecadal é usada a correlação entre o espectro observado e modelado no período que vai desde o fim da primeira banda ao final do espectro associado ao índice DIST das duas últimas bandas.

Ao final do cálculo desses índices é feita uma avaliação ponderada para representação interanual e outra para interdecadal, conforme equações 14, 15, 16 e 17, para que os modelos possam ser classificados. A avaliação interanual é dada por:

$$AVAL_a = \beta_c \left(\frac{CORREL_1 - CORREL_{MIN1}}{CORREL_{MAX1} - CORREL_{MIN1}} \right) + \beta_d \left(\frac{DIST_{MAX1} - DIST_1}{DIST_{MAX1} - DIST_{MIN1}} \right) \quad (14)$$

tal que

$$\beta_c + \beta_d = 1 \quad (15)$$

Sendo, CORRELMIN1 a menor correlação obtida entre os modelos do IPCC e CORRELMAX1 a máxima correlação em relação ao observado na primeira região do espectro avaliada. Assim como, DISTMAX1 é a máxima distância das variabilidades por bandas das rodadas dos modelos IPCC e DISTMIN o mínimo em relação à primeira região do espectro avaliada.

A avaliação interdecadal é dada por:

$$AVAL_d = \sigma_c \left(\frac{CORREL_2 - CORREL_{MIN2}}{CORREL_{MAX2} - CORREL_{MIN2}} \right) + \sigma_d \left(\frac{DIST_{MAX2} - DIST_2}{DIST_{MAX2} - DIST_{MIN2}} \right) \quad (16)$$

$$\sigma_c + \sigma_d = 1 \quad (17)$$

Sendo, CORRELMIN1 a menor correlação obtida entre os modelos do IPCC e CORRELMAX1 a máxima correlação em relação ao observado na primeira região do espectro avaliada. Assim como, DISTMAX1 é a máxima distância das variabilidades por bandas das rodadas dos modelos IPCC e DISTMIN o mínimo em relação a primeira região do espectro avaliada.

As variáveis β_c , β_r , σ_c e σ_r assumem valores entre 0 e 1 (conforme equações 13 e 15). Para valores $\beta_c > \beta_d$ e $\sigma_c > \sigma_r$, a correlação exerce maior influência na avaliação do modelo, enquanto que para $\beta_c < \beta_d$ e $\sigma_c < \sigma_r$ o índice DIST exerce maior efeito.

As variáveis AVALy e AVALd assumem valores entre 0 e 1 que indicam, respectivamente, o pior entre os modelos avaliados e o melhor deles, segundo este critério.

Dado o exposto pretende-se a utilização dos critérios de avaliação para fins de identificar se os modelos representam adequadamente os padrões de variação do século XX. Admite-se que uma melhor representação do século XX levaria a uma representação mais coerente do futuro.

3.5. ETAPA 2: Remoção de viés da precipitação

Uma função probabilística muito atraente para a representação de variáveis hidrológicas que apresenta versatilidade de formas e coeficientes de assimetria das variáveis é a distribuição gama. Essa função possui numerosas aplicações bem sucedidas em previsão de vazões, e pode ser aplicada para análises de precipitação de duração diárias, semanais, mensais e anuais. Para o presente trabalho, a correção estatística via função gama será feita nas séries de precipitações mensais dos modelos do CMIP5.

A Figura 5 descreve a relação entre a probabilidade acumulada e a precipitação. O mapeamento da probabilidade foi utilizado para correção do viés da precipitação mensal baseando-se em duas funções de distribuição acumulativa (FDA), sendo uma a função obtida por meio de dados modelados e a outra função obtida por meio de dados observados. Cada FDA encaixa-se com uma distribuição gama, salvando os parâmetros de forma e escala.

Para a correção gama será utilizado um ajuste de viés seguindo os seguintes passos:

- 1° - Ajuste da distribuição gama para os dados observados;
- 2° - Ajuste da distribuição gama para os dados de precipitação dos modelos para o século XX (para identificar o problema no ajuste do viés);
- 3° - Ajuste da distribuição gama para os dados de precipitação dos modelos do século XXI;
- 4° - Correção das precipitações do século XX e XXI.

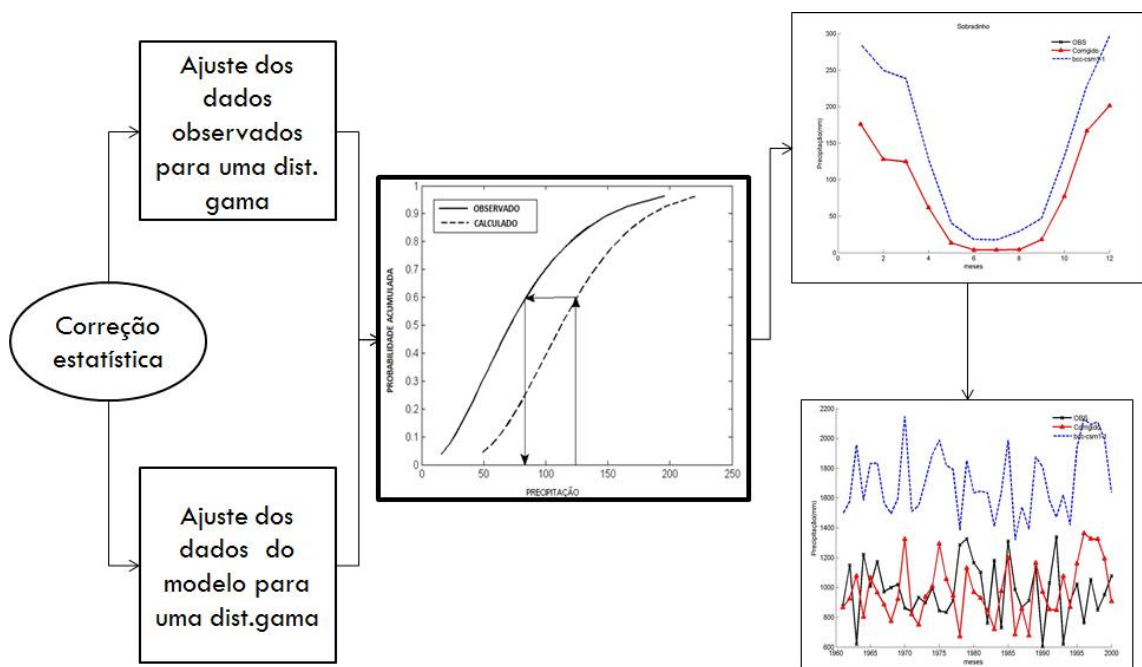


Figura 5- Remoção de viés da precipitação a ser adotado no trabalho.

3.6. ETAPA 3: Estimativa de evapotranspiração

Para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o) é usado o método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), sendo este o utilizado no trabalho em desenvolvimento tendo em vista que o painel de especialista da FAO recomenda como referência este método. Segundo este método a evapotranspiração de referência é dada segundo a equação 18:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (18)$$

Onde: ET_o é a evapotranspiração de referência (mm dia-1); R_n é a radiação líquida na superfície das culturas (MJ m² dia-1); G é o fluxo de calor no solo (MJ m² dia-1); T é a média diária da temperatura do ar a 2 m de altura (°C); u₂ é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s-1); e_s é a pressão da saturação de vapor (kPa); e_a é a pressão de vapor atual (kPa); (e_s - e_a) é o déficit de saturação de vapor (kPa); Δ é a inclinação da curva da pressão de vapor versus temperatura (kPa °C-1); γ (kPa oC-1) é a constante psicrométrica.

A velocidade do vento, a radiação líquida, a pressão de vapor real ou atual e a temperatura máxima e mínima formam um conjunto de dados básicos para estimativa da ETo Penman-Monteith (EToPM). Através deste conjunto de dados é possível estimar diversas variáveis. Conforme equações a seguir.

Observa-se que o vento é calculado pelo modelo representando o valor médio para uma grande área espacial associado. O downscaling desta variável para a escala local não tem apresentado bons resultados. Devido este fato optou-se neste trabalho para implementar a recomendação de Allen et al. (1998) de utilizar na estimativa de evapotranspiração por Penman-Monteith no cenários de mudança climática a velocidade do vento de 2,0 m/s.

A constante psicrométrica é dada pela equação 19:

$$\gamma = 0,665 \times 10^{-3} P_{atm} \quad (19)$$

Sendo a pressão atmosférica (P_{atm}) dada pela equação 20 (em kPa):

$$P_{atm} = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26} \quad (20)$$

Onde z é a altitude em relação ao nível do mar (m). Δ é dado pela equação 21:

$$\Delta = \frac{4098 \left(0,6108 * \exp \frac{17,27 * T}{T + 237,3} \right)}{(T + 237,3)^2} \quad (21)$$

\exp é a base do logaritmo natural e T é a média da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), que pode ser calculada pela equação 22:

$$e^{\circ}(T) = 0,6108 * \exp \frac{17,27 * T}{T + 237,3} \quad (22)$$

Onde $e^{\circ}(T)$ é a pressão de saturação de vapor (kPa) em determinada temperatura do ar T ($^{\circ}\text{C}$). A pressão de vapor na saturação, Equação 23:

$$e_s = \frac{e^{\circ}(T_{max}) + e^{\circ}(T_{min})}{2} \quad (23)$$

e

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (24)$$

Onde R_{ns} é a radiação de onda curta líquida que chega à superfície terrestre (MJ m² dia⁻¹); R_{nl} é a radiação de onda longa líquida que sai da superfície terrestre (MJ m² dia⁻¹).

$$R_{ns} = 1 - \alpha(R_s) \quad (25)$$

Onde α é o albedo ou coeficiente de reflexão da cobertura vegetal, o qual assume o valor de 0,23 para a grama de referência hipotética (adimensional):

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{max}K^4 + T_{min}K^4}{2} \right) (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (26)$$

Onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($4,903 \times 10^{-9}$ MJ m² dia⁻¹); T_{máx}K é a temperatura máxima absoluta durante período de 24 h (K); T_{mín}K é a temperatura mínima absoluta durante período de 24 h (K); R_s é a radiação solar medida ou calculada (MJ m⁻² dia⁻¹); R_{so} é a radiação de céu claro medida ou calculada (MJ m⁻² dia⁻¹), e calculada pela Equação 27:

$$R_{so} = (0,75 + 2 * 10^{-5}z)R_a \quad (27)$$

Onde z é a altitude da estação em relação ao nível do mar (m) e R_a é a radiação extraterrestre (MJ m⁻² dia⁻¹).

Allen et al. (1998) assume que a temperatura mínima é muito próxima do ponto de orvalho o ar deve está próximo da saturação com vapor d'água e a umidade relativa deve está muito próxima de 100%. Esta temperatura é utilizada para estimativa da pressão de vapor real (e_a), neste caso, conforme Equação 28:

$$e_a = e^*(T_{min}) = 0,611 \exp \left(\frac{17,27T_{min}}{T_{min} + 273,3} \right) \quad (28)$$

Onde e_a é a pressão de vapor real (kPa); (T_{mín}) é a pressão de saturação de vapor na temperatura mínima (kPa) e T_{mín} é a temperatura mínima (°C).

Segundo Allen *et al.*(1998), o grau de cobertura de nuvens de uma localidade é que estabelece a diferença entre a temperatura máxima e mínima. Com pouca cobertura de nuvens as temperaturas são mais elevadas durante o dia em razão da transparência atmosférica à radiação solar que chega, e temperaturas mais baixas a noite em razão de menos radiação de onda longa refletida que é absorvida pela atmosfera. Isto proporciona um maior T_{max} e um menor T_{min}. Já em dias nublados, T_{max} é um pouco menor por conta da radiação absorvida e refletida pelas nuvens. Da mesma forma, T_{min} também será um pouco mais alta, devido à cobertura de nuvens que opera como uma coberta que diminui a radiação de onda longa líquida refletida. Assim, o cálculo da radiação baseia-se pela diferença entre as temperaturas máxima e mínima, conforme Equação 29:

$$R_s = k_{R_s} \sqrt{(T_{max} - T_{min})} R_a \quad (29)$$

Onde R_s é a radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); R_a é a radiação extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); T_{max} é a temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$); T_{min} é a temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$) e k_{R_s} é o coeficiente de ajuste ($^{\circ}\text{C}^{-0.5}$).

3.7. ETAPA 4: O modelo hidrológico SMAP

O modelo chuva-vazão SMAP (LOPES et al., 1981), a ser utilizado neste trabalho, é do tipo conceitual, determinístico e de estrutura concentrada. Este modelo faz parte da grande família dos modelos hidrológicos de cálculo de umidade do solo. Sua estrutura é relativamente simples, cujos parâmetros são relacionados com parâmetros físicos médios da bacia.

O SMAP, em sua versão mensal, utiliza em seu esquema conceitual de dois reservatórios lineares representando o solo (camada superior) e o aquífero, como pode ser visualizado na Figura 6. A cada evento de precipitação (P) é realizado um balanço de massa. Uma parcela de (P) é transferida como escoamento superficial (E_s). Este cálculo é feito através da equação do “Soil Conservation Service” (SCS) para escoamento superficial. A lâmina restante da precipitação subtraída do escoamento superficial ($P-E_s$) sofre perda por evaporação em nível de evaporação potencial (E_p), logo a lâmina remanescente ($P-E_s-E_p$) é adicionada a um reservatório que representa a camada superior do solo. Neste, a umidade é atualizada ao longo do tempo através das perdas por evapotranspiração real (E_r) que dependem do nível do reservatório (R_{solo}) e da capacidade de saturação do solo (Sat). Outra saída deste reservatório é a recarga no reservatório subterrâneo (Rec) onde é utilizado o conceito de capacidade de campo ($Capc$) para determiná-la. Este terceiro reservatório também é linear e o nível de água existente (R_{sub}) é deplecionado a uma taxa constante de recessão do escoamento básico (K), resultando em escoamento básico (E_b). A soma do escoamento superficial e básico fornece a vazão no ponto de controle da bacia.

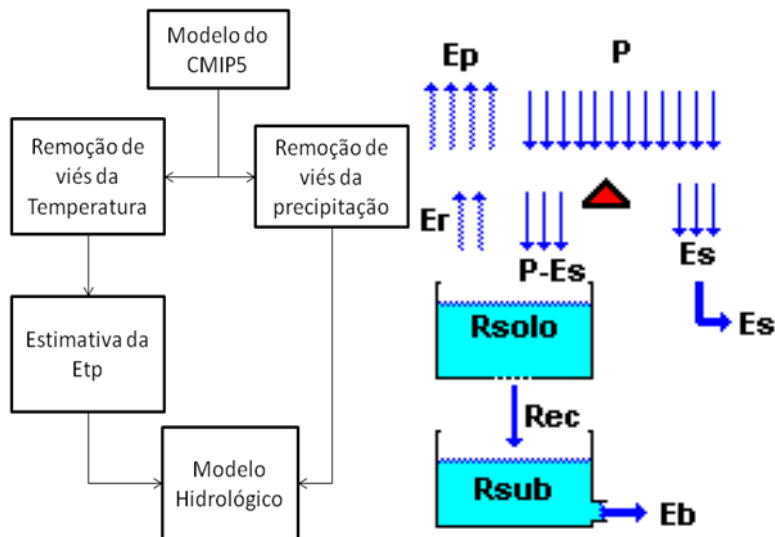


Figura 6 - Esquema conceitual do modelo chuva-deflúvio SMAP.

Fonte: Adaptado de LOPES *et al.*(1981)

O SMAP possui seis parâmetros: capacidade de saturação do solo (Sat); parâmetro que controla o escoamento superficial (PEs); coeficiente de recarga, parâmetro relacionado com a permeabilidade na zona não saturada do solo (Crec); taxa de deplecionamento (K) do nível (Rsub) que gera o escoamento de base (Eb); taxa de umidade do solo inicial (TUin) que determina o nível inicial do reservatório (Rsolo); valor do escoamento de base inicial (EBin). Os parâmetros dos modelos são ajustados na calibração do modelo para cada bacia de estudo.

3.8. ETAPA 5: Análise das Projeções

Nesta seção serão apresentadas as medidas estatísticas utilizadas para análise das séries temporais dos modelos globais do CMIP5. As projeções dos modelos, para este trabalho, são analisadas segundo o mostrado na Figura 7 tendo em vista que os modelos podem não representar corretamente o padrão de variação do clima, o que torna necessário a análise de sua capacidade de simular o clima.

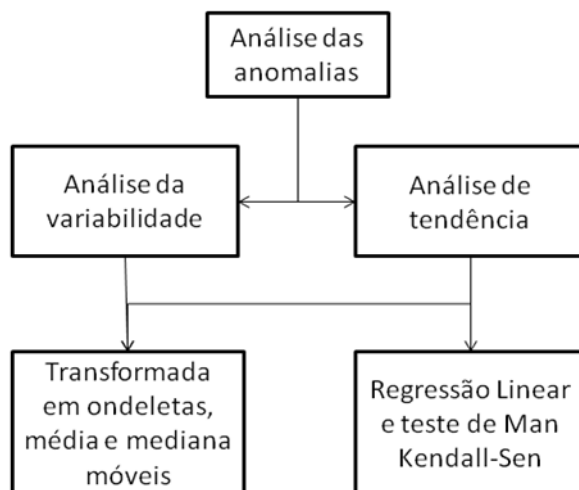


Figura 7- Análise das projeções do século XXI.

3.8.1. Cálculo das Anomalias Médias Anuais

Para o cálculo da anomalia na média anual será considerado a Equação 30, dada pela diferença entre a média anual o cenário do século XXI e média anual do cenário histórico sobre a média anual do século XX:

$$A_{\text{anual}} = \frac{(P_{\text{XXI}}^a - P_{\text{XX}}^a)}{P_{\text{XX}}^a} \cdot 100 \quad (30)$$

Onde P_{XXI}^a é média da precipitação anual para o cenário do século XXI e P_{XX}^a é a média da precipitação anual para o cenário histórico.

3.8.2. Análise de tendência das precipitações anuais

Para analisar a tendência do século XXI, neste trabalho, as séries de precipitações anuais dos cenários do século XXI serão padronizadas com base nas características da série do cenário histórico. Essa padronização segue a equação 31:

$$Z = \frac{X_{\text{XXI}}^j - \bar{X}_{\text{XX}}}{\sigma_{\text{XX}}} \quad (31)$$

Onde Z é a precipitação do cenário do século XXI padronizada, X_{XXI}^j a precipitação anual dos cenários RCP4.5 e RCP8.5 para um ano j, \bar{X}_{XX} a precipitação anual média do

cenário histórico e σ_{xx} o desvio padrão da série de precipitações anuais do cenário histórico.

As metodologias de avaliação de tendência/variabilidade podem ser divididas em dois tipos quanto à sua abordagem: Métodos Clássicos e Métodos Modernos.

Neste trabalho serão utilizados os métodos clássicos de Mann-Kendall-Sen, Média Móvel de 10 anos e Regressão Linear, e dentre os métodos modernos, utilizar-se à-se a análise de ondeletas (*wavelets*).

3.8.2.1. Métodos Clássicos

Nos testes de tendência, segundo Xu et al. (2003), a hipótese nula H_0 ocorre na ausência de tendência na série histórica. Já a hipótese não nula (H_1) ocorre quando existe uma tendência na série.

Os testes estatísticos podem ser classificados em paramétricos e não paramétricos (NAGHETTINI e PINTO, 2007). Os testes paramétricos se baseiam na hipótese de que os dados amostrais foram obtidos a partir de uma população cuja distribuição seja conhecida ou previamente especificada. Já os testes não-paramétricos não necessitam da especificação do modelo distributivo da população, sendo formulados com base nas características da amostra. Segundo Xu et al. (2003), os testes não-paramétricos são mais robustos.

Ainda segundo Xu et al. (2003), a utilização de testes paramétricos e não-paramétricos dependem das características dos dados em que se está trabalhando.

O modelo de regressão linear é dado pela equação 32 (HELSEL e HIRSCH, 2002):

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i$$
$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$
(32)

Onde: y_i é a i -ésima observação da variável dependente;

x_i é a i -ésima observação da variável independente;

β_0 é a interceptador;

β_1 é a inclinação;

ε_i é o erro aleatório ou residual para a i -ésima observação;

n é o tamanho da amostra.

O erro ε_i depende da variabilidade natural do sistema, possui média igual a zero e variância (σ^2) constante, portanto, ε_i é independente de x_i .

A regressão linear é obtida estimando-se os valores de β_0 e β_1 através de alguma técnica de ajustamento. Segundo Naghettini e Pinto (2007), o método dos mínimos quadrados é um dos procedimentos mais adequados para este ajuste.

Se uma tendência linear está presente em uma série, a declividade (mudança por unidade de tempo) pode ser estimada usando o método não-paramétrico desenvolvido por Sen (1968).

No método de Sen são computadas a declividade de N pares de dados através da equação 33:

$$Q_i = \frac{(x_j - x_k)}{(j - k)} \quad (33)$$

Para $i = 1, 2, \dots, N$.

Onde x_j e x_k são os valores de x nos períodos j e k respectivamente, com $j > k$. A mediana dos N valores de Q_i será a declividade de Sen. Se houver apenas uma referência em cada período de tempo, então:

$$N = \frac{n(n-1)}{2} \quad (34)$$

Onde n é o tamanho da série. Se N for ímpar, a declividade de Sen será:

$$Q_{\text{mediana}} = Q_{(N+1)/2} \quad (35)$$

Se N for par, a declividade de Sen será:

$$Q_{\text{mediana}} = \frac{[Q_{(N)/2} + Q_{(N+2)/2}]}{2} \quad (36)$$

O valor de Q_{mediana} é então testado através de um teste bicaudal com grau de confiança de $100(1 - \alpha) \%$ e a declividade estimada é obtida através de um teste não paramétrico.

O teste de tendência de Man-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975; KENDALL e GIBBONS, 1990) é um dos mais utilizados na avaliação de tendências de séries históricas naturais que se distanciam da distribuição normal, como a de qualidade da água, vazões, temperatura e precipitação (HAMED, 2009).

No teste de Mann-Kendall, também conhecido por Kendall's tau, assume-se que os dados estão aleatoriamente distribuídos, caso das séries históricas naturais.

O teste estatístico de Mann-Kendall é dado pela equação 37 (BURN e ELNUR, 2002):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i-1}^n Sgn(X_j - X_i) \quad (37)$$

Onde X_i e X_j são valores sequenciais, n é o tamanho da série e

$$Sgn(\theta) = \begin{cases} +1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \quad (38)$$

O teste de Mann-Kendall possui dois parâmetros importantes para a análise de tendência: o nível de significância α e a declividade β (BURN e ELNUR, 2002).

A declividade β é determinada por (HIRSCH et al., 1982):

$$\beta = \text{Mediana} \left[\frac{(X_j - X_i)}{(j - i)} \right] \quad (39)$$

para todo $i < j$

3.8.2.2. Análise da Transformada em Ondeletas

Para análise de tendência e do comportamento dos diferentes padrões de variações do clima será utilizado a transformada em ondeletas.

A análise da transformada em ondeletas (wavelets) vem se tornando uma ferramenta bastante utilizada para a análise de variações locais de séries temporais, uma vez que os sistemas físicos apresentam características não-estacionárias de várias frequências (BOLZAN, 2004). A decomposição destas séries em espaços de tempo-frequência permite a determinação dos modos dominantes de variabilidade, bem como a variação destes modos no tempo (TORRENCE e COMPO, 1998).

A análise em ondeletas consiste em decompor um sinal a diferentes níveis de resolução, processo conhecido como multiresolução (BOLZAN, 2004).

Ainda segundo Bolzan (2004) a expansão em série de ondeletas e a transformada são dadas pela equação 40:

$$\langle f, \Psi_{a,b} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (40)$$

Onde: $\Psi(t)$ é a função base geradora simples;

a é a variável de dilatação;

b é a variável de translação; t é o tempo.

O termo ondeleta refere-se a um conjunto de funções com forma de pequenas ondas gerada por dilatações e translações, de uma função base geradora (BOLZAN, 2004).

Existem dois tipos básicos de funções ondeletas: ondeletas contínuas e discretas. Dentre as contínuas, a mais comum e a utilizada neste estudo foi a ondeleta de Morlet, dada por:

$$\Psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2} \quad (41)$$

Onde: ω_0 é a frequência adimensional, que, no caso da ondeleta de Morlet, é igual a seis, de forma a satisfazer a condição de admissibilidade; e η é o parâmetro adimensional do tempo.

A função ondeleta de Morlet possui o parâmetro de frequência igual a 6.

Para avaliação e análise de tendência dos modelos, no referido trabalho, será calculado o espectro de energia global sobre as regiões de estudo para todas as rodadas dos modelos do IPCC e as observações. Em seguida, serão identificados os principais padrões de variação das séries observadas a partir do Espectro Global da Ondeleta e a partir disto as seguintes etapas serão necessárias:

- decomposição do sinal para obter os coeficientes *wavelets* no domínio transformado. Para o caso da série observada de precipitação nas três regiões avaliadas, a decomposição foi igual à soma das bandas características no século XX e o resíduo. A partir da Equação 42, tem-se:

$$R(i) = z(i) - \sum_{b=1}^b B_b(i) \quad (42)$$

Onde: $z(i)$ é o valor da variável padronizada para o ano i ; $B_b(i)$ é o valor da banda b no ano i .

- análise e processamento dos coeficientes neste domínio;
- reconstrução do sinal a partir dos coeficientes modificados.

O processo de reconstrução será repetido para os modelos do CMIP5 para as mesmas bandas observadas. Em seguida, será feita análise do comportamento das bandas reconstruídas.

4. Cronograma físico de atividades

PRODUTO	ATIVIDADE	Mês/2014				
		ago	set	out	nov	dez
1	1.1 Elaboração de Relatório técnico descritivo da metodologia de trabalho e da Base de Dados com respectivas justificativas	x				
	2.1 Calibração dos Modelos Hidrológicos a serem utilizados		x	x		
2	2.2 Elaboração de Relatório técnico descritivo da Calibração dos Modelos Hidrológicos		x	x		
	2.3 Simulação Hidrológica para o clima presente tendo como dados de entrada os resultados regionalizados dos três modelos climáticos globais gerando a série de vazões naturais para as bacias definidas		x	x		
	2.4 Elaboração de Relatório Técnico analítico das simulações hidrológicas realizadas			x		
	2.5 Projeções Hidrológicas para o clima futuro tendo como dados de entrada os resultados regionalizados dos três modelos climáticos globais			x		
	2.6 Elaboração de Relatório Técnico analítico das análises de projeções realizadas			x		
	2.7 Elaboração de relatório síntese atual e futuro do Balanço Hídrico 2010-2040			x		
3	3.1 Simulação hidrológica considerando o uso atual/projetado sobre o recurso hídrico pelo setor elétrico a partir das bacias hidrográficas incrementais aos reservatórios do ONS a partir do cenário futuro de disponibilidade hídrica gerado			x	x	
	3.2 Elaboração de Relatório técnico analítico da disponibilidade futura considerando o uso de energia para as bacias definidas				x	x
	3.1 Simulação hidrológica considerando o uso atual/projetado sobre o recurso hídrico pelo setor elétrico a partir das bacias hidrográficas incrementais aos reservatórios do ONS a partir do cenário futuro de disponibilidade hídrica gerado				x	x
	3.2 Elaboração de Relatório técnico analítico da disponibilidade futura considerando o uso					

	de energia para as bacias definidas					
	3.3 Elaboração de relatório síntese atual e futuro do Balanço Hídrico 2010-2040 considerando a integração com o uso de energia					
4	4.1 Elaboração de um portfólio de orientações gerais para o planejamento e gestão dos recursos hídricos considerando os cenários de disponibilidade hídrica gerados;					x
	4.2 Elaboração do Relatório Final consolidado com reflexões sobre adaptação do setor					x

5. Referências bibliográficas

ALLEN, R. G. et al. **Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements.**.. FAO-Irrigation and Drainage Paper. Roma, p. 297. 1998.

ALEXANDRE, A. M. B. **Previsão de vazões mensais para o sistema interligado nacional utilizando informações climáticas.** Fortaleza-CE: Universidade Federal do Ceará, Tese de Doutorado em engenharia civil, 2012.

ALVES, B. C. C.; SOUZA FILHO, F. A.; SILVEIRA, C. S. Análise de tendência e Padrões de Variação das séries históricas de vazões do Operador Nacional de Sistemas(ONS). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 4, p. 19-34, 2013.

BANCOMUNDIAL. **Relatório sobre o desenvolvimento mundial de 2010: desenvolvimento e mudança climática/ Banco Mundial.** São Paulo. São Paulo: UNESP, 2010.

BOGGESS, A., NARCOWICH, F. J. A first course in wavelets with fourier analysis. 2nd.ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2009.

BOLZAN, M. J. A. Análise da transformada em ondeletas aplicada em sinal geofísico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 1, p. 37-41, 2004.

BURN, D. H.; ELNUR, M. A. H. .. Detection of hydrologic trends and variability. **Journal of Hydrology**, v. 255, p. 107-122, 2002.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2007: The physical science basis. Cambridge, 18 p. 2007a.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press: Cambridge, 23 p, 2007b.

KENDALL, M. G. . G. J. D. **Rank Correlation Methods.** 5. ed. Londres: Griffin, 1990.

KENDALL, M. G. **Rank Correlation Measures.** 1. ed. Londres: Charles Griffin, 1975.

HAMED, K. H. Exact distribution of the Mann-Kendall trend test statistic for persistent data.. **Journal of Hydrology**, v. 365, p. 86-94, 2009.

HELSEL, D. R.; HIRSCH, R. M. Statistical methods in water resources: U. S. geological survey techniques of water-resources investigations. Capítulo A3. Disponível em: <<http://water.usgs.gov/pubs/twri/twri4a3/>>. Acesso em: 2002.

HIRSCH, R. M.; SLACK, J. R.; SMITH, R. A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data.. **Water Resources Research**, v. 18, p. 107-121, 1982.

LÁZARO, Y.M.C. **Avaliação dos modelos do IPCC – AR4 quanto à sazonalidade e à variabilidade plurianual de precipitação no século XX em três regiões da América do Sul - projeções e tendência para o século XXI.** Dissertação de Mestrado.2011. 182f. Fortaleza, Ceará, Universidade Federal do Ceará (UFC), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), 2011.

LOPES, J. E. G.; BRAGA JR., B. P. F.; CONEJO, J. G. L. A. **Simulação Hidrológica: Aplicações de um Modelo Simplificado.** Anais do III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Fortaleza: [s.n.]. 1981. p. 42-62.

MANN, H. B. Non-parametric tests against trend.. **Econometrica**, v. 13, p. 245-259, 1945.

MARENGO, J. A.; SOARES, W. R. Impacto das mudanças climáticas no Brasil e Possíveis Cenários Climáticos: Síntese do Terceiro Relatório do IPCC de 2001. CPTEC-INPE, p. 29 2005.

- MARENGO J.A., VALVERDE, M. C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. *Revista Multiciência Campinas Ed. No. 8 Maio 2007.*
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. 1. ed. Belo Horizonte: CPRM – Serviço Geológico do Brasil., 2007.
- NEW, M., HULME, M., JONES, P.D.,: Representing twentieth century space-time climate variability. Part 1: development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. *Journal of Climate* 12, 829-856, 1999.
- NEW, M., LISTER, D., HULME, M., MAKIN, I.,: *A high-resolution data set of surface climate over global land areas*. **Climate Research** 21, 1-25, 2001.
- NOBRE C. A. *Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança no clima*. In: *Brasil, Presidência da República. Núcleo de Assuntos Estratégicos. Mudança do clima: Negociações Internacionais sobre a Mudança do Clima. Brasília. Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. Secretaria de Comunicação de Governo e Gestão Estratégica*. V. 1 parte 2, p. 147-216, 2005.
- NOBRE, C.A., SELLERS,P.J. AND SHUKLA,J. "Amazonian deforestation and regional climate change". **J. Clim.**, 4, 957-988.1991.
- NÓBREGA, M.T., COLLISCHONN, W., TUCCI, C.E.M., PAZ, A.R. Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 15, p. 585–595, 2011.
- ONS - **Atualização de Séries Históricas de Vazões – 1931 a 2010**. Operador Nacional do Sistema – ONS. Brasília. 36p, 2011.
- ROCHA, V. B. Uma abordagem de Wavelets Aplicada à Combinação de previsões: Uma análise teórica e experimental. 2008. 155f. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia), Curitiba, 2008.
- RUCH, D.K.,FLEET, P. J.V.. *Wavelet theory: an elementary approach with applications*. Segunda edição. John Wiley & Sons,Inc,Hoboken, New Jersey, p480,2009.
- SEBER, G. A. F. *Multivariate Observations*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 1984.
- SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau.. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, p. 1379-1389, 1968.
- SILVEIRA,C.S. ; SOUZA FILHO, F. A; LÁZARO, Y. M. C.;COSTA, A. C.; SALES, D. C.; COUTINHO, M.M. Sazonalidade da Precipitação Sobre o Nordeste Setentrional Brasileiro nas Simulações do IPCC-AR4. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**.V.17, n.3, 125-134,2012.
- SILVEIRA, C. S. et al. Avaliação de desempenho dos modelos do CMIP5 quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no século xx sobre a região nordeste do Brasil, Amazônia e bacia do Prata e análise das projeções para o cenário RCP8.5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 317-330, Setembro 2013. ISSN 0102-7786.
- TORRENCE, C.; COMPO, G. P. *A practical guide to wavelet analysis*, **Bull. Am. Meteor. Soc.**, v.79, n.1, p.61-78, 1998.
- XU, Z. X.; TAKEUCHI, K.; ISHIDAIRA, H. Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation.. **Journal of Hydrology**, v. 279, p. 144-150, 2003.
- WILKS, D.S *Statistical Methods in the Atmospheric Science*. **San Diego: Academic Press**, 467 p,1995.