

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**TENDÊNCIAS DE TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO E CENÁRIOS DE MUDANÇAS
CLIMÁTICAS DE LONGO PRAZO NO NORDESTE DO BRASIL E EM ILHAS
OCEÂNICAS**

FRANCINETE FRANCIS LACERDA

RECIFE – PE
2015

FRANCINETE FRANCIS LACERDA

**TENDÊNCIAS DE TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO E CENÁRIOS DE MUDANÇAS
CLIMÁTICAS DE LONGO PRAZO NO NORDESTE DO BRASIL E EM ILHAS
OCEÂNICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil na área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientadora: Prof.^aDr.^a Maria do Carmo Sobral
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Coorientador: Dr. Paulo Nobre
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

RECIFE – PE
2015

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

- L131e Lacerda, Francinete Francis.
Tendências de temperatura e precipitação e cenários de mudanças climáticas de longo prazo no Nordeste do Brasil e em ilhas oceânicas / Francinete Francis Lacerda. - Recife: O Autor, 2015.
114 f, il., fig., gráfs., tabs.
- Orientadora: Profa. Dra. Maria do Carmo Martins Sobral.
Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Nobre.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2015.
Inclui Referências, Glossário e Anexos.
1. Engenharia Civil. 2. Aumento da Temperatura. 3. Aridificação.
4. Detecção e Cenários de Mudanças de clima. I. Sobral, Maria do Carmo Martins (Orientadora). II. Nobre, Paulo (Co-orientador). II.
Título

FRANCINETE FRANCIS LACERDA

TENDÊNCIAS DE TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO E CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS DE LONGO PRAZO NO NORDESTE DO BRASIL E EM ILHAS OCEÂNICAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil na área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em: 16 de outubro de 2015

BANCA EXAMINADORA

Maria do Carmo Martins Sobral – Ufpe
(orientador)

Paulo Nobre - Inpe
(Co-orientador)

Eduardo Delgado Assad – Embrapa Informática Agropecuária
(examinador externo)

Geraldo Majella Bezerra Lopes – IPA
(examinador externo)

José Roberto Gonçalves de Azevedo - Ufpe
(examinador interno)

Josiclêda Domiciano Galvíncio - Ufpe
(examinador interno)

AGRADECIMENTOS

Sou grata aos professores Maria do Carmo Sobral e Paulo Nobre que tiveram a generosidade de compartilhar seu tempo, suas experiências e ideias comigo. Dentre aqueles os quais não lidei diretamente, deixo expressa aqui a minha particular gratidão para com os pesquisadores Geraldo Majella Bezerra Lopes, Eduardo Delgado Assad e ChouSin Chan pelas contribuições e apoio.

Também sou grata ao INPE e ao IPA, como também, aos irmãos, amigos e parceiros que me apoiaram nessa empreitada.

“Eu já disse, mas vou repetir: não se represa um rio, não se engana a natureza, faça a represa o que quiser, pois o rio cedo ou tarde vai arranjar um jeito de rasgar a terra, abrir um caminho, e voltar a correr em seu leito de origem.”

F. Pessoa

LACERDA, F. F. TENDÊNCIAS DE TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO E CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS DE LONGO PRAZO NO NORDESTE DO BRASIL E EM ILHAS OCEÂNICAS. Brasil. 2015. 109f. Texto para defesa de tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

RESUMO

No Nordeste do Brasil, e particularmente em Pernambuco, a precipitação e a temperatura estão entre as variáveis meteorológicas mais importantes para os estudos das mudanças climáticas, uma vez que sua variabilidade espacial e temporal são características marcantes do clima local. Os objetivos com este trabalho foram: determinar a presença de tendências de longo período da precipitação e da temperatura em Pernambuco, com a utilização de índices de detecção de mudanças climáticas, com base em dados observacionais de estações meteorológicas no continente e em ilhas oceânicas; realizar um estudo de balanço hídrico para o diagnóstico da disponibilidade hídrica e simulações numéricas com modelo atmosférico regional aninhado em cenário global de mudança climática, do modelo climático do Hadley Centre. Este trabalho contém o diagnóstico das alterações climáticas em localidades do estado de Pernambuco e em ilhas no Oceano Atlântico Tropical com dados de séries temporais diárias de temperatura e de precipitação com mais de 40 anos, com cenários futuros de mudanças do clima na região, para o período de 2010 a 2050. Os resultados indicaram tendências de aumento das temperaturas máximas e redução da pluviosidade média anual em todos os postos inspecionados. Em decorrência, constatou-se a tendência à aridificação em localidades do Sertão e do Agreste de Pernambuco. As análises dos dados climáticos em ilhas oceânicas mostraram um pequeno aquecimento em Fernando de Noronha e acentuada tendência de aquecimento e de aridificação em Cabo Verde, semelhantes às tendências de longo prazo detectadas em Araripina, no semiárido de Pernambuco. As tendências de temperatura e precipitação, observadas, são indicativas de que ocorrem processos de aridificação em Pernambuco e Cabo Verde. Os resultados do balanço hídrico e suas projeções indicaram uma diminuição da disponibilidade de água no solo e precipitação total e aumento das taxas de evapotranspiração potencial, em praticamente todas as áreas, ao longo dos anos. As simulações atmosféricas foram consistentes com os dados das estações em relação ao presente aquecimento; os cenários de mudanças climáticas para 2010-2050 indicaram um aumento mais rápido da temperatura máxima diária no Nordeste se comparada às simulações para o passado recente.

Palavras-chave. Aumento da temperatura. Aridificação. Detecção e cenários de mudanças climáticas.

LACERDA, F. F. TRENDS OF TEMPERATURE AND PRECIPITATION AND SCENARIOS OF CHANGES LONG-TERM CLIMATE IN NORTHEAST BRAZIL AND OCEAN ISLANDS. Brazil. 2015. 114f. Text thesis defense (PhD in Civil Engineering). Federal University of Pernambuco, Recife, 2015.

ABSTRACT

In Northeast Brazil, and particularly in Pernambuco, precipitation and temperature are among the most important meteorological variables for studies of climate change, since their spatial and temporal variability characterize the local climate. The aims with this study were to determine the presence of long-term precipitation and temperature trends in Pernambuco, with the use of climate change detection rates, based on observational data from weather stations on the continent and on oceanic islands and to conduct a water balance study for the diagnosis of water availability and numerical simulations with regional atmospheric model nested in the global scenario of climate change, the Hadley Centre climate model. This work contains the diagnosis of climate change in the State of Pernambuco locations and in the Atlantic Ocean Tropical islands with data daily time temperature series and precipitation over 40 years with future scenarios of climate change in the region, for the period of 2010 to 2050. The results showed increasing trends of maximum temperatures and reduced average annual rainfall at all stations inspected. Also, a tendency to aridificação in the Sertão and in the Agreste of Pernambuco was detected. The analysis of climate data on oceanic islands showed a small heating in Fernando de Noronha and a marked warming trend and aridificação in Cape Verde, similar to long-term trends detected in Araripina, in the semiarid region of Pernambuco. Trends in temperature and precipitation observed are indicative that aridificação processes in Pernambuco and Cape Verde are on the way. The results of the water balance and its projections indicated a decrease in water availability in the soil and total precipitation and increased evapotranspiration rates, in almost all areas over the years. The weather simulations were consistent with the data of the stations in relation to this warming rate; the climate change scenarios for 2010-2050 indicated a faster increase in the maximum daily temperatures in the Northeast compared to simulations of the recent past.

Keywords. Detection and scenarios of climate change. Aridification. Increased temperatures.

LISTA DE FIGURAS

- Figuras 1** - Ilustrações sobre o monitoramento sistemático das quantidades de CO₂ na atmosfera nos períodos: 2011-2015 e 1957-2015..... 17
- Figuras 2** - Anomalias das TSM (°C) no Pacífico equatorial tropical e das precipitações no Nordeste do Brasil no período de 1961 a 2009, respectivamente 27
- Figura 3** - Mapa das precipitações climatológicas (mm) com base no período de 1961 a 1990, para o Nordeste do Brasil com escala de cores e percentual de dias com déficit hídrico médio com base no período de 1970 a 1990 com escala de cores..... 28
- Figura 4** - Imagem do satélite meteorológico GOES 8 mostrando uma Onda de Leste ocorrida no dia 17 de junho de 2010..... 28
- Figura 5** - Mapa de Pernambuco com a localização dos postos pluviométricos..... 30
- Figura 6** - Frequências de ocorrência das precipitações pluviométricas maiores do que 100 mm em 24 horas na Região Metropolitana do Recife, Zona da Mata Setentrional e Zona da Mata Meridional de Pernambuco..... 32
- Figura 7** - Posição média da Zona de Convergência Intertropical, agosto de 2010. 33
- Figura 8** - Condições de El Niño e La Niña no Pacífico equatorial mostrando o sistema de acoplamento entre o oceano e a atmosfera durante cada evento especificamente. 35
- Figura 9** - Anomalias das Temperaturas da Superfície do Mar-TSM durante um El Niño forte (acima) e La Niña (abaixo)..... 37
- Figura 10** - Esquema do padrão de dipolo sobre o Oceano Atlântico em anos normais, chuvosos, muito chuvosos, secos e muito secos..... 37
- Figura 11** - Mapa do Nordeste do Brasil delineando a área susceptível ao processo de desertificação. 40
- Figura 12** - Evolução temporal das temperaturas (°C) máximas (preto) e mínimas (verde) em Vitória de Santo Antão, Pernambuco. 41
- Figura 13** - Evolução temporal das temperaturas (°C) máximas diárias em Araripina, Pernambuco. 41
- Figura 14** - Localização geográfica das cinco estações meteorológicas do IPA..... 57
- Figura 15** - Distribuição Espacial dos 56 postos pluviométricos com mais de 45 anos de dados..... 58
- Figura 16** - Tendências das temperaturas (°C) máximas e mínimas para Araripina, Vitória de Santo Antão, Recife, Petrolina e Caruaru períodos de 1950-60 a 2005 65
- Figura 17** - Tendência decenal das temperaturas máximas (linha contínua) e mínimas (linha tracejada) (°C/década) para cada mês do ano nas estações meteorológicas de Araripina, Vitória, Recife, Petrolina e Caruaru. 65
- Figura 18** - Mapa com a identificação das Mesorregiões geográficas em Pernambuco (Sertão, Sertão do São Francisco, Agreste, Zona da Mata e Região Metropolitana do Recife). ... 67
- Figura 19** - Mapa com a identificação das Microrregiões Homogêneas de Pernambuco (1. Araripina, 2. Salgueiro, 3. Pajeú, 4. Moxotó, 5. Petrolina, 6. Itaparica, 7. Vale do Ipanema, 8. Vale do Ipojuca, 9. Alto Capibaribe, 10. Médio Capibaribe, 11. Garanhuns,

12. Brejo, 13. Mata Meridional, 14. Mata Setentrional, 15. Vitória de Santo Antão, 16. Itamaracá, 17. Recife e 18 Suape).	68
Figura 20 - Tendência decenal da evapotranspiração potencial (ETP) mensal (mm/década) em 40 anos de observação em (a) Araripina, (b) Vitória de Santo Antão, (c) Recife, (d) Petrolina, e (e) Caruaru.	70
Figura 21 - Tendência decenal do armazenamento de água no solo(mm/década)em 40 anos de observação em (a) Araripina, (b) Vitória de Santo Antão, (c) Recife, (d) Petrolina, e (e) Caruaru..	71
Figura 22 - Séries temporais anuais da evapotranspiração potencial (ETP) em mm/mês, para cada mês (eixo das ordenadas) para as localidades de Araripina/PE, Petrolina/PE, Caruaru/PE e Vitória de Santo Antão/PE.	72
Figura 23 - Tendência decenal das temperaturas máximas (linha contínua) e mínimas (linha tracejada) (oC/década) para cada mês do ano nas estações meteorológicas; de (a) Fernando de Noronha e (b) Cabo Verde.	73
Figura 24 - Tendências de precipitação e temperatura em Fernando de Noronha (coluna esquerda) e Sal em Cabo Verde (coluna direita) no período de 1956-2010.	74
Figura 25 - Tendências de temperatura (°C/década) simulada pelo (a) NCEP reanálises, (b) Eta-HadCM3 e (c) modelos Eta-BESM de Janeiro 1960 a Dezembro 2000, e (d) Eta-HadCM3 cenário A2 de mudança climática para 2010-2050, para área de 13S-3S, 43W-38W	75
Figura 26 - Tendência das temperaturas simuladas com modelo ETA/Lamepe para (a) período de 1960-2000 (°C/década) na área 8°S-38°W.	77
Figura 27 - Tendências das temperaturas simuladas com modelo ETA/Lamepe para o período de 2010 a 2050 (°C/década) corte para o Nordeste do Brasil.	78
Figura 28 - Tendência de precipitação (mm/década), simulado com o modelo Eta/BESM para o período de 1960 a 2005	79
Figura 29 - Tendências de precipitação (mm/ano) simuladas com modelo ETA/CPTEC para Pernambuco para os períodos de 1960 a 1990; 2010 a 2040 e 2040 a 2070.	80
Figura 30 - Tendências das temperaturas simuladas com modelo ETA/CPTEC para Pernambuco nos períodos de 1960 a 1990; 2010 a 2040 e 2040 a 2070 (°C/década).	81

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** - Anos de seca no Nordeste do Brasil e de ocorrência de El Niño nos últimos quatro séculos. 30
- Tabela 2** – Abordagem sobre aspectos dos modelos de previsão relacionados às incertezas na construção dos cenários climáticos..... 56
- Tabela 3** - Tendências e valores médios para o máximo e o mínimo dos maiores valores médios anuais da temperatura, máxima e mínima da menor temperatura (°C/década), tendência precipitação (mm/década) para vários locais. As cores existentes (negrito, azul e preto) indicam significância estatística dos índices de tendência: negrito (99%), azul (95%) e preto (90%). Os valores sem significância estatística estão em vermelho. 62
- Tabela 4** - Relação das 23 localidades selecionadas, com os valores das tendências calculadas para as séries históricas de precipitação (mm/ano) e valor médio anual da precipitação (mm) para os períodos: 1911-1937 a 1992-2011..... 68
- Tabela 5** - Análises de tendências para os 33 postos pluviométricos (mm/ano) agregados por bacia hidrográfica e por mesorregião do estado de Pernambuco no período de 1964 a 2004 69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A2	Cenário de Altas Emissões
ARM	Armazenamento de água no solo
BESM	Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre - Brazilian Earth System Model
BH	Balanco hídrico
CAD	Capacidade de água disponível
CO ₂	Gás Carbônico
DEF	Deficiência hídrica
DESTAE	Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Fernando de Noronha
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ENOS	El Nino Oscilação do Sul
ETA	Modelo Regional
ETP	Evapotranspiração potencial
ETR	Evapotranspiração real
EXC	Excedente hídrico
GEE	Gases de efeito estufa
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPA	Instituto Agrônômico de Pernambuco
IPCC-AR4	Relatório anual do IPCC número quatro
IPCC-AR5	Relatório anual do IPCC número cinco
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
LAMEPE	Laboratório de Meteorologia de Pernambuco
HadCM3	Hadley Centre Coupled Model, version 3 – é o modelo de circulação geral da atmosfera - acoplado
MIT	Instituto de Tecnologia de Massachusetts
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
ONU	Organização das Nações Unidas
OS	Oscilação do Sul
PE	Pernambuco
RCLIMDEX	Software utilizado para processamento e controle de qualidade dos dados
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
Tnn	Mínimas das Temperaturas Mínimas

Tnx	Máximas das Temperaturas Mínimas
Txn	Mínima das Temperaturas Máximas
Txx	Máximo das Temperaturas Máximas
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO	15
1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA	18
1.2 HIPÓTESE DA PESQUISA	19
1.3 OBJETIVOS	20
1.3.1 <i>Objetivo geral</i>	20
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	20
2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 POLÍTICA NACIONAL DE MUDANÇA DO CLIMA.....	21
2.2 POLÍTICA ESTADUAL DE MUDANÇA DO CLIMA	22
2.3 VARIABILIDADE E CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS EM PERNAMBUCO....	26
2.4 PROCESSO DE DESERTIFICAÇÃO EM PERNAMBUCO.....	38
2.5 TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS E VARIABILIDADE HÍDRICA	44
2.6 MODELOS DE PREVISÃO E SIMULAÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS	50
3- MATERIAIS E MÉTODOS.....	57
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA A PRECIPITAÇÃO	66
4.2 ANÁLISE DOS BALANÇOS HÍDRICOS	69
4.3 ILHAS NO OCEANO ATLÂNTICO	73
4.4 RESULTADOS DA MODELAGEM	75
5- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	82
REFERÊNCIAS	85
ANEXO 1 - GLOSSÁRIO.....	104
ANEXO 2– ARTIGOS ENVIADOS PARA PUBLICAÇÃO ...ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.	

1- INTRODUÇÃO

Os atuais reflexos ambientais, sociais, econômicos e políticos advindos das mudanças climáticas são os maiores já enfrentados pela humanidade. As alterações do clima no planeta decorrentes do acúmulo de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, onde se destaca o gás carbônico, representam desafios, principalmente, pela forma, abrangência e velocidade com que estão acontecendo e suas consequências para a vida no planeta. O Quinto Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima (IPCC, 2013), divulgado em outubro de 2013, apresenta uma síntese sobre a mudança global na temperatura do sistema terrestre que vem ocorrendo no último século, sendo o aumento médio da temperatura do ar de 0,78°C se comparado com os períodos 1850-1900 e 2003-2012, com variação, em média entre 0,72°C a 0,85°C. Os extremos diários de temperatura na terra têm aumentado desde 1950 e desde então se pode observar que o sistema climático como um todo acumulou mais energia do que perdeu (IPCC, 2013). O aumento nas temperaturas médias juntamente com a nova composição química da atmosfera desencadearam alterações significativas no sistema climático planetário, afetando o padrão de chuvas, com impactos no ciclo hidrológico, produzindo enchentes intensas, secas severas e frequentes ondas de frio e calor, com consequências na segurança alimentar, na saúde e na segurança hídrica.

A região Nordeste do Brasil, em geral e o estado de Pernambuco, em especial, estão vulneráveis aos processos de desertificação, à ocorrência de eventos extremos do clima tais como secas e enchentes e ao avanço do mar. Segundo o Relatório do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2013), é provável que o semiárido nordestino tenha sua precipitação reduzida em até 20% até 2040, com aumento de temperatura de até 1°C. Este relatório, também, indica que todo o Brasil deverá ficar ao menos 3°C mais quente até o fim do século, as precipitações aumentariam em 30% nas regiões Sul e Sudeste e diminuiriam em até 40% nas regiões Norte e Nordeste.

O PBMC foi criado em setembro de 2009, resultado de uma ação conjunta entre os Ministérios da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e do Ministério do Meio Ambiente (MMA), fornecendo avaliações científicas sobre as mudanças climáticas para o Brasil, incluindo os impactos, vulnerabilidades e ações de adaptação e mitigação. Em fevereiro de 2009, o Governo de Pernambuco, por intermédio do Decreto nº 33.015, instituiu o Fórum Pernambucano de Mudanças Climáticas e, em 2011, lançou o seu Plano Estadual de

Mudanças Climáticas, instituído pela Lei Estadual nº 14.090/10, com o objetivo de conscientizar a população sobre as vulnerabilidades do estado às mudanças climáticas.

Estudo de detecção de mudanças climáticas em Pernambuco (LACERDA *et al.*, 2010, 2015^a e ^b), revela um aumento de 4°C na temperatura máxima diária no período de 1961 a 2009, com base nos dados da estação meteorológica de Araripina (NOBRE, 2011) – no Instituto Agrônomo de Pernambuco - IPA e diminuição média de 275 mm (correspondendo a 57%) dos totais pluviométricos anuais obtidos de um conjunto de oito postos pluviométricos, com dados no mesmo período, localizados no Vale do Rio Pajeú, em Pernambuco. A diminuição anual das chuvas esteve acompanhada do aumento dos períodos máximos de estiagem que passaram de 20 para 35 dias e do aumento da frequência de eventos de precipitação intensa (por exemplo, superior a 50 mm em 24 horas), que passou de cinco para nove ocorrências por ano.

Tais sinais constituem evidências de que processos de desertificação estão em curso nas áreas estudadas dessa parte do semiárido de Pernambuco. Nota-se que a diminuição dos totais pluviométricos anuais é observada globalmente nas regiões tropicais entre 10S e 10N, assim como o aumento da frequência da ocorrência de precipitações episódicas intensas associadas às mudanças climáticas globais (TRENBERTH *et al.*, 2007). O cenário climático brasileiro acompanha a mesma tendência de aquecimento global, em que as mudanças mais significativas são o aumento de temperatura, modificações nos padrões de chuvas e alterações na distribuição de extremos climáticos, tais como: secas, enchentes e inundações (MARENGO *et al.*, 2007).

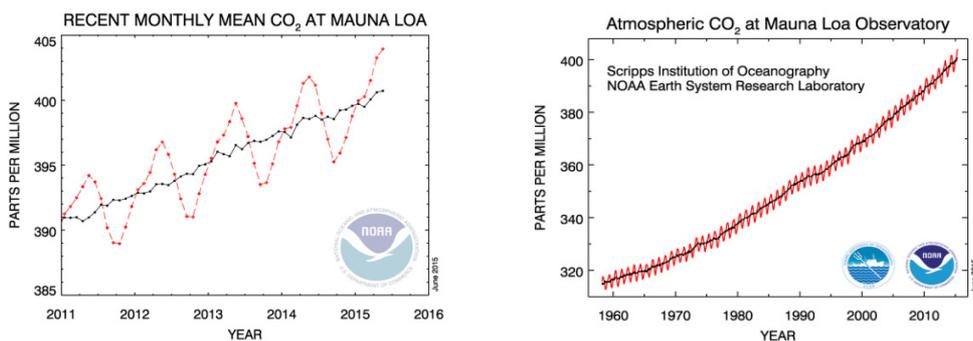
Estudos recentes sobre o aquecimento global indicam que as mudanças climáticas poderão afetar a produção nacional e causar aumento das áreas de risco na região Nordeste do Brasil (ASSAD e PINTO, 2008). Sob essa ótica, as análises das variações de chuva e de temperatura, bem como, seus impactos no balanço hídrico, servirão como base para detecção dos efeitos do aquecimento global, mudanças climáticas locais e seus consequentes impactos. Um impacto inquestionável é o aumento da evapotranspiração com o aumento da temperatura. Esse aumento tende a ser especialmente danoso às atividades agrícolas, pois reduziria a água disponível às plantas, no solo, onde se encontram as raízes e que, no caso de algumas culturas, não são profundas.

Nobre e Assad (2005), sugeriram que, em se confirmando o aumento das temperaturas, o atual zoneamento agrícola brasileiro deverá sofrer modificações para

contemplar a nova realidade do clima. Os autores concluíram que o calendário de plantio em algumas localidades poderá ser modificado como ação mitigadora. Também, foram levantadas outras prováveis consequências, como a redução do ciclo das culturas, que poderia tornar algumas plantas mais eficientes em termos de assimilação e transformação energética, porém mais susceptíveis à deficiência hídrica devido ao aumento da evapotranspiração.

A figura 1.1 mostra a curva de *Keeling*, ícone das alterações climáticas, com destaque para os últimos quatro anos, medidos no observatório de Mauna Loa, no Havaí, que indica um aumento sistemático nas concentrações globais de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera. Os valores ultrapassaram o recorde global de 400 partes por milhão (ppm), em abril de 2015, como consequência, principalmente, das atividades humanas (queima de combustíveis fósseis como carvão e petróleo e o desmatamento). Esse acúmulo atingiu o mais alto nível dos últimos 800.000 anos. Atingir esse patamar, de 400 ppm, indica que o acúmulo de CO₂ aumentou em mais de 120 ppm desde a era pré-industrial e mais de 50 % desse total se deu a partir da década de 1980. Na figura 1.2, a linha tracejada representa os valores médios mensais, centrados no meio de cada mês; linha com os símbolos quadrados representa a média para o ciclo sazonal (média móvel de sete ciclos sazonais).

Figuras1- Ilustrações sobre o monitoramento sistemático das quantidades de CO₂ na atmosfera nos períodos: 2011-2015 e 1957-2015.



(Fonte: www.co2now.org <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>)

1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA

O que permeou esta pesquisa prioritariamente foi à busca pela compreensão das interações e repercussões das alterações do clima global no clima de Pernambuco. Esta pesquisa aborda um estudo exploratório demonstrando que a mudança do clima não apenas é algo midiático, distante e fora da realidade cotidiana das pessoas, mas que, na raiz das mudanças climáticas globais, reside a grande fragilidade da governança ambiental.

Na visão popular, frequentemente a mudança climática está associada a variações do tempo, algo como ter um belo dia de sol e de forma brusca, surgir em um temporal. É comum associar o termo “mudança climática” a ocorrências de temporais, trovões, rajadas de ventos e deslizamentos, algo que tem a ver com suas vidas e que, de certa forma, pode se relacionar com a mudança do clima. Entretanto, desde a realização da Conferência Mundial de Meio Ambiente no Rio de Janeiro, em 1992, a expressão “mudança climática” ganhou refinamento. Com a criação da UNCCC (United Nations Convention on Climate Change) e, em especial, com o Protocolo de Kyoto, o termo vem ganhando complexidade.

Na formulação mais recente do termo, este passa a ser visto como resultado de uma cadeia de fenômenos complexos de longo prazo, sendo descrito de forma mais técnica e científica. É curioso ver na mídia impressa, uma tendência a explorar mais o lado científico, político e econômico da mudança climática, sem, contudo relacioná-las ao cotidiano das pessoas. De uma forma geral, o fenômeno Mudança Climática - MC é visto como algo que cabe aos governos e às empresas poluidoras resolverem o problema, mas é realmente um problema dos governos ou de negociações abstratas entre empresas que compram direitos de poluir plantando árvores na Amazônia? Essa forma de entendimento tem pouco a ver com o cotidiano das pessoas e, provavelmente contribui para desinformação sobre o assunto (LACERDA *et al.*, 2014).

Dessa forma, esta pesquisa busca a responder algumas perguntas tais como as listadas abaixo.

- As temperaturas do ar estão aumentando de forma expressiva em alguns locais de Pernambuco?
- Há ligação com o aquecimento global?
- O padrão de chuva está mudando? É possível detectar os sinais dessas mudanças nas observações meteorológicas pretéritas?
- O que contam as séries históricas de longo período do estado?

- Por fim, é possível descrever os cenários do clima futuro, em Pernambuco, utilizando a base local de conhecimento associada com o conhecimento disponível no Brasil e no mundo?

O pressuposto que alicerçou a pesquisa reside na compreensão de que, sendo a precipitação e a temperatura variáveis que fornecem uma ampla base espacial e temporal, observadas e atestadas cientificamente, com relação direta com os eventos extremos de chuva e secas que ocorreram em Pernambuco, tenta esclarecer *de que forma as alterações no padrão das precipitações e temperaturas diárias são capazes de afetar diretamente o armazenamento de água no solo e a evapotranspiração em Pernambuco? Quais seus efeitos em relação aos processos de desertificação? Que cenários são esperados para o futuro em termos de chuva e temperatura?*

1.2 HIPÓTESE DA PESQUISA

Com base nas séries históricas de precipitação, de temperatura e nos cenários do clima passado e futuro sobre Pernambuco, é possível detectar tendências de longo período no padrão de chuva e de temperatura, relacionadas às mudanças climáticas globais.

Testar se as tendências climáticas de longo período observadas sobre Pernambuco e ilhas oceânicas acompanham a tendência de aquecimento global, em que as mudanças mais significativas são aumento da temperatura, as modificações nos padrões de distribuição temporal das chuvas e alterações na distribuição de extremos climáticos.

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos da pesquisa estão assim descritos:

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral com este estudo foi o de testar se as tendências climáticas de longo período observadas sobre Pernambuco e ilhas oceânicas do Atlântico acompanham as de aquecimento global, e que as mudanças mais significativas são: o aumento da temperatura, modificações nos padrões de distribuição temporal das chuvas e alterações na distribuição de extremos climáticos.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste estudo são:

- 1- identificar as tendências de temperatura e precipitação sobre Pernambuco e sobre as ilhas tropicais do Atlântico utilizando séries temporais;
- 2- realizar um estudo de balanço hídrico para o diagnóstico de mudanças climáticas em localidades de Pernambuco;
- 3- avaliaros efeitos atuais nas áreas selecionadas, visando a identificar possíveis alterações no padrão das precipitações e temperaturas diárias e seus impactos na umidade do solo e na evapotranspiração e,
- 4- formularcenários e tendências climáticas futuras para o Nordeste e Pernambuco utilizando um modelo atmosférico regional.

2-FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1.POLÍTICA NACIONAL DE MUDANÇA DO CLIMA

As evidências científicas acerca das alterações climáticas exigem uma resposta global. O relatório Stern (STERN *et al.*, 2007) avaliou as evidências sobre os impactos das alterações do clima seus custos e riscos econômicos. A revisão feita leva a uma conclusão simples - os benefícios da ação superam os custos econômicos de não agir. As mudanças climáticas afetarão os elementos básicos da vida para as populações do mundo: acesso à água, produção de alimentos, saúde e meio ambiente. Centenas de milhões de pessoas poderão ser atingidas pela fome, escassez de água e inundações costeiras. Vários países já enfrentam períodos incertos e irregulares de chuvas e as previsões para o futuro indicam que as mudanças climáticas vão tornar a oferta de água cada vez menos previsível e confiável. Economizar água para o futuro é um fato objetivo e certo.

Por várias questões os modelos climáticos referenciados pelo IPCC limitam suas projeções até o ano de 2100 e, ainda assim, são análises globais e não oferecem detalhes. Embora esse fato gere incertezas no que diz respeito às previsões em larga escala e regionais, as tendências locais e globais estão bem estabelecidas e são robustas (confiáveis). Os modelos usam para seus cálculos diferentes possibilidades (cenários) de evolução futura das emissões de gases de efeito estufa de acordo com tendências de consumo, produção, aumento da população e uso dos recursos naturais. As probabilidades estimadas, com razoável segurança, atualmente indicam que as temperaturas globais subirão entre 1,1°C e 6,4°C, até aquela data, uma faixa de variação que depende do cenário selecionado e da sensibilidade dos modelos utilizados nas simulações. Em geral espera-se uma elevação em torno de 4°C até o fim do século.

Nos oceanos, o aumento das temperaturas provoca a elevação do nível médio do mar, mudanças nas correntes marinhas e na composição química da água, provocando a acidificação. É fato que nenhuma região planetária será poupada de alterações e muitas serão penalizadas pesadamente, especialmente as mais pobres, como é o caso das regiões Norte e Nordeste do Brasil (hotspots). Mesmo que as concentrações de gases efeito estufa parem totalmente, seus efeitos já foram desencadeados e não serão mais evitados, de forma que, irão piorar cada vez mais já sob o efeito cumulativo retardado da década de 1970. Como a mudança do modelo econômico não acontecerá de imediato, a humanidade deve estar

preparada para grandes dificuldades, ou seja, maiores do que as que vivem hoje, como é o caso da falta de adaptação ao ambiente do semiárido do Brasil.

Nesse sentido, o Plano Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC, 2008) visa ao desenvolvimento e aprimoramento de ações de mitigação no Brasil, colaborando com o esforço mundial para redução das emissões de gases de efeito estufa, bem como promover condições para adaptação aos impactos das mudanças climáticas.

Em síntese, o plano apresenta metas de redução do índice de desmatamento anual da Amazônia (redução de 80% até 2020, de acordo com o Decreto 7390/20101), ampliar em 11% ao ano, nos próximos dez anos, o consumo interno de etanol, dobrar a área de florestas plantadas para 11 milhões de hectares em 2020, sendo 2 milhões de ha com uso de espécies nativas, trocar 1 milhão de geladeiras antigas por ano, em 10 anos, aumentar a reciclagem de resíduos sólidos urbanos em 20% até 2015, aumentar a oferta de energia elétrica de cogeração, principalmente a de bagaço de cana-de-açúcar, para 11,4% da oferta total de eletricidade no país em 2030 e reduzir as perdas na distribuição de energia elétrica à taxa de 1.000 GWh por ano, nos próximos 10 anos.

2.2.POLÍTICA ESTADUAL DE MUDANÇA DO CLIMA

A Lei Nº 14.090, criada em 17 de julho de 2010, estabelece a Política Estadual de Enfrentamento às Mudanças Climáticas e contempla o desenvolvimento de várias especialidades científicas (PERNAMBUCO, 2010).

Dentre os objetivos está a promoção de capacitação e fortalecimento institucional do estado de Pernambuco em ciência, tecnologia e meio ambiente para o estudo das causas e efeitos das mudanças climáticas, criando condições para o estabelecimento de uma Agência ou Instituto Pernambucano para as Mudanças Climáticas, conforme descreve o artigo nº 3, bem como o incentivo a iniciativas e projetos, públicos e privados, que favoreçam a mitigação de emissões de gases de efeito estufa e adaptação às mudanças climáticas e, ainda, apoiar as pesquisas sobre fatores climáticos naturais e antrópicos, em especial sobre o sistema climático urbano e regional (PERNAMBUCO, 2011).

Com esta Lei, o poder público deverá estabelecer a obrigatoriedade da avaliação da dimensão climática nos processos decisórios referentes às suas políticas públicas e programas, de forma a estimular e controlar a adoção de ações de pesquisa, adaptação e

mitigação das emissões dos referidos gases, de acordo com o artigo nº 8. Portanto, caberão às secretarias e outras entidades públicas estaduais os devidos encaminhamentos para obter o respectivo êxito.

O estado de Pernambuco tem um papel relevante com relação às mudanças climáticas e na adaptação aos seus efeitos. É altamente vulnerável aos seus efeitos, em especial nas áreas litorâneas de baixa declividade, está sujeito a aridificação e aos eventos extremos de seca e chuva (PERNAMBUCO, 2011).

Segundo conteúdo do Plano Estadual de Mudanças Climáticas de Pernambuco (PERNAMBUCO, 2011) e de acordo com os critérios nacionais, o estado possuiu 135 municípios nas áreas suscetíveis à desertificação (ASD), onde vivem, de acordo com o último censo demográfico mais de 2,6 milhões de habitantes, conformando uma densidade demográfica acima de 35 hab./km². Esse quadro poderá levar a processos migratórios, deslocando as populações afetadas para os centros urbanos, agravando ainda mais a condição socioeconômica.

Sendo assim, as informações sobre o tempo e o clima devem pautar as agendas do setor público estadual, seja operacionalmente, seja em pesquisas. E para a efetivação dessas metas, torna-se necessário o estabelecimento de um modelo de gestão e administração pública que garanta a disponibilização desses serviços. Dentre as estratégias de mitigação e adaptação do setor público propostas pela nova legislação, no seu artigo nº 7 há a determinação de que o Governo do Estado deverá criar um instituto de pesquisa para trabalhar as questões das mudanças climáticas, que contemple a temática do clima e do oceano, com o intuito de pesquisas, previsões e monitoramentos climático e oceânico permanentes.

O artigo nº 9 é outra cláusula que estabelece ações de extrema importância para o desenvolvimento de pesquisa, adaptação e mitigação da emissão de gases de efeito estufa no setor público. Dois pontos se destacam: ampliação da capacidade de observação sistemática e modelagem climática e a geração e divulgação de informações climáticas para tomada de decisões e avaliação dos impactos da mudança climática sobre a saúde humana, de outras formas de vida e dos ecossistemas e promover medidas para mitigar ou evitar esses impactos.

Outros setores do governo também estão estrategicamente contemplados na Lei, a exemplo dos recursos hídricos, que, por meio do artigo nº 12, considera a questão das mudanças climáticas na Política Estadual de Recursos Hídricos, definindo inclusive, as áreas de maior vulnerabilidade e as respectivas ações de prevenção, mitigação e adaptação. Bem

como na saúde, ao considerar que cabe ao poder executivo, conforme define o artigo nº 15, investigar e monitorar os fatores de risco à vida e à saúde, decorrentes da mudança do clima e implantar as medidas necessárias de prevenção e tratamento, de modo a evitar ou minimizar seus impactos sobre a saúde pública.

Além das áreas de oceano e de gestão costeira, do semiárido e de desertificação, conforme os respectivos artigos 17 e 18 ficado determinado que o Estado deva promover pesquisas para demonstrar o papel do oceano como regulador climático com incentivo a estudos integrados sobre mudanças climáticas e suas consequências para o oceano, ilhas oceânicas, zonas costeiras e a variabilidade climática interanual de secas e eventos climáticos extremos sobre Pernambuco que constituem estratégias de redução de emissões a serem implantadas no semiárido para o combate à desertificação.

Não obstante, o artigo nº 39 ainda estabelece ao Poder Público, a possibilidade de instalar um sistema de previsão de eventos climáticos extremos e alerta rápido para atendimento das necessidades da população, em virtude das mudanças climáticas, que deverá incluir os seguintes elementos. Dentre os critérios torna-se necessário a realização de parcerias com organizações de previsão do tempo, de forma a facilitar a entrega, interpretação e aplicação dos dados no gerenciamento de riscos climáticos; disponibilização de informação sobre mudanças climáticas através de bases regionais, com tendências e projeções acessíveis pela internet e disponíveis para toda a sociedade e a instalação de sistemas de alerta precoce.

Pernambuco contrasta diversidade biológica e altos níveis de degradação dos ecossistemas, resta apenas 1% de Floresta Atlântica, incluindo mangue e restinga e cerca de 50% da Caatinga (ATLAS DA BIODIVERSIDADE DE PERNAMBUCO, 2002). As regiões do Agreste e Sertão apresentam grande pressão antrópica sobre os recursos naturais, especialmente sobre os recursos florestais. A ação antrópica se mostra intensa, resultando em grandes áreas degradadas pelo consumo de lenha especialmente, na região do Araripe (PERNAMBUCO, 2007). O estado de Pernambuco, também, apresenta considerável déficit hídrico e ocupa uma posição de destaque, no contexto das mudanças do clima e seus efeitos, junto com um passivo ambiental considerado. Associam-se à alta vulnerabilidade os efeitos das mudanças do clima (PERNAMBUCO, 2006).

Pernambuco é um dos estados mais vulneráveis do Brasil, aos efeitos das mudanças do clima (IPCC, 2007); sofre com a intensificação do processo do avanço do mar e da erosão costeira, ocorrência de eventos extremos de chuva nas mesorregiões do Sertão ao Litoral, como também está sob a influência de secas recorrentes (PERNAMBUCO, 2006). Na

Região Metropolitana do Recife estes efeitos podem ser agravados pelo aumento médio do nível do mar, tendo em vista a alta densidade populacional do litoral (882 hab./km²), o percentual elevado de impermeabilização do solo e as baixas altitudes da área costeira (entre 2 e 4m), acarreta grande risco para as cidades.

Nesse sentido, a identificação e estudo das vulnerabilidades e suscetibilidades aos impactos esperados de longo prazo são instrumentos fundamentais para elaboração de políticas públicas aos efeitos da mudança climática, definindo e implementando medidas de adaptação e mitigação. A política estadual intitulada de “enfrentamento” tem como principal foco três temáticas: Desertificação, Gestão Costeira e Urbanismo, baseando-se nas seguintes propostas:

- a) criar uma base de dados sobre mudanças climáticas, proporcionando uma integração de informações de fácil acesso, uma rede de informação;
- b) criar um órgão como uma agência ou instituto especialmente para a temática de clima e oceano, com o intuito de controle e integração permanente;
- c) incentivar a criação de unidades de conservação pelos poderes locais, estimulando principalmente as do tipo Reserva Particular do Patrimônio Natural;
- d) desenvolver e implantar instrumentos legais que permitam o Pagamento de Serviços Ambientais que possam contribuir para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e propiciar condições favoráveis de adaptação às mesmas, assim como de prevenção contra processos danosos;
- e) ordenar e penalizar a emissão do dióxido de carbono na atmosfera;
- f) apoiar a realização de pesquisas científicas e tecnológicas voltadas ao desenvolvimento sustentável, sua acessibilidade à população e usufruto;
- g) implantar um plano de educação ambiental contextualizada, no âmbito formal e não formal, valorizando o conhecimento das causas das mudanças climáticas e as possibilidades de minimização de suas consequências, de maneira sistêmica, como medida fundamental para estimular a atuação cidadã diante do cenário de crise socioambiental;
- h) buscar parcerias entre os níveis de governo, retomando as agendas ambientais onde as mesmas foram construídas e se valendo de instâncias ligadas à temática ambiental já instituídas;

- i) fortaleceras instituições de pesquisa meteorológica e climatológica, com definição de mecanismos para produção de conhecimento com base regionalizada referente a fenômenos e mudanças climáticas, com criação de sistema de alerta precoce;
- j) disseminar informações sobre eventos climáticos extremos.

O advento das mudanças climáticas proporcionaram legislações inovadoras que vieram contribuir para o desenvolvimento da meteorologia no Brasil e em Pernambuco. Entretanto, elas só terão a respectiva eficácia, caso respeitem a abrangência da ciência da atmosfera, a qual é multidisciplinar e abrange vários campos das ciências da natureza, tecnologia da informação, engenharia, saúde e sociais.

2.3 VARIABILIDADE E CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS EM PERNAMBUCO

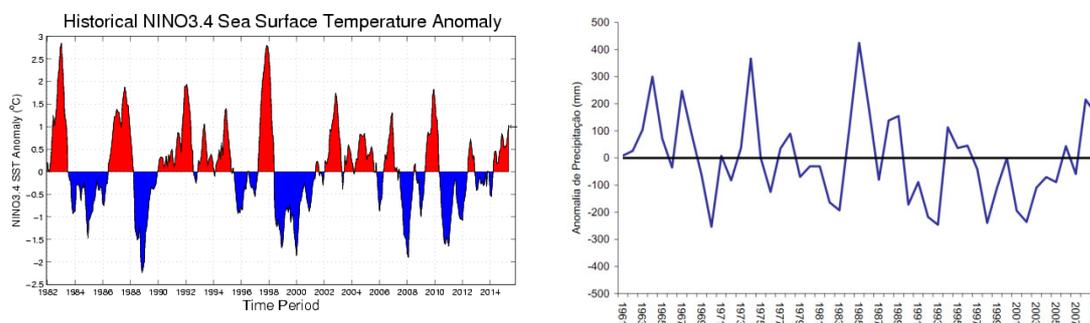
Para compreender melhor as mudanças climáticas globais sobre o Nordeste, foi necessário conceituar os processos que influenciam o padrão espacial e temporal das distribuições das precipitações pluviométricas.

Um fator relevante, nesse contexto, é a irregularidade na distribuição dos índices de chuva, que tem como característica à alta variabilidade interanual na região tropical, com a ocorrência de anos secos, muito secos e chuvosos, irregularmente distribuídos no tempo. Diversos fatores podem contribuir para explicar a alta variabilidade da precipitação sobre o Nordeste do Brasil, dentre eles a flutuação nos valores da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do Oceano Pacífico Tropical e do Atlântico. No geral, os valores das anomalias das TSM, do Pacífico Tropical e Atlântico, estão associados às mudanças no padrão da circulação geral da atmosfera e consequentes variações e/ou anomalias de precipitação do Nordeste do Brasil (Figura 2.2)(CHU, 1991; ROPELEWSKI; HALPERT, 1987).

O “El Niño” e a Oscilação Sul (Figura 2.1) são fenômenos globais conhecidos como ENOS, responsáveis em parte pela variabilidade interanual da precipitação, globalmente. As anomalias climáticas relacionadas ao fenômeno são persistentes e podem durar vários meses. Os episódios de El Niño são cíclicos e podem reaparecer a cada 2 a 7 anos (ARAGÃO, 1986).

O clima da região Nordeste do Brasil (NEB) apresenta, em média, precipitação acumulada que pode variar em valores inferiores a 600 mm/ano e superiores a 2.000 mm/ano (Figura 3). No Norte da região, área que abrange o semiárido, o período chuvoso ocorre entre os meses de fevereiro a maio e no setor leste de abril a agosto.

Figuras2 - Anomalias das TSM (°C) no Pacífico equatorial tropical e das precipitações no Nordeste do Brasil no período de 1961 a 2015, respectivamente.



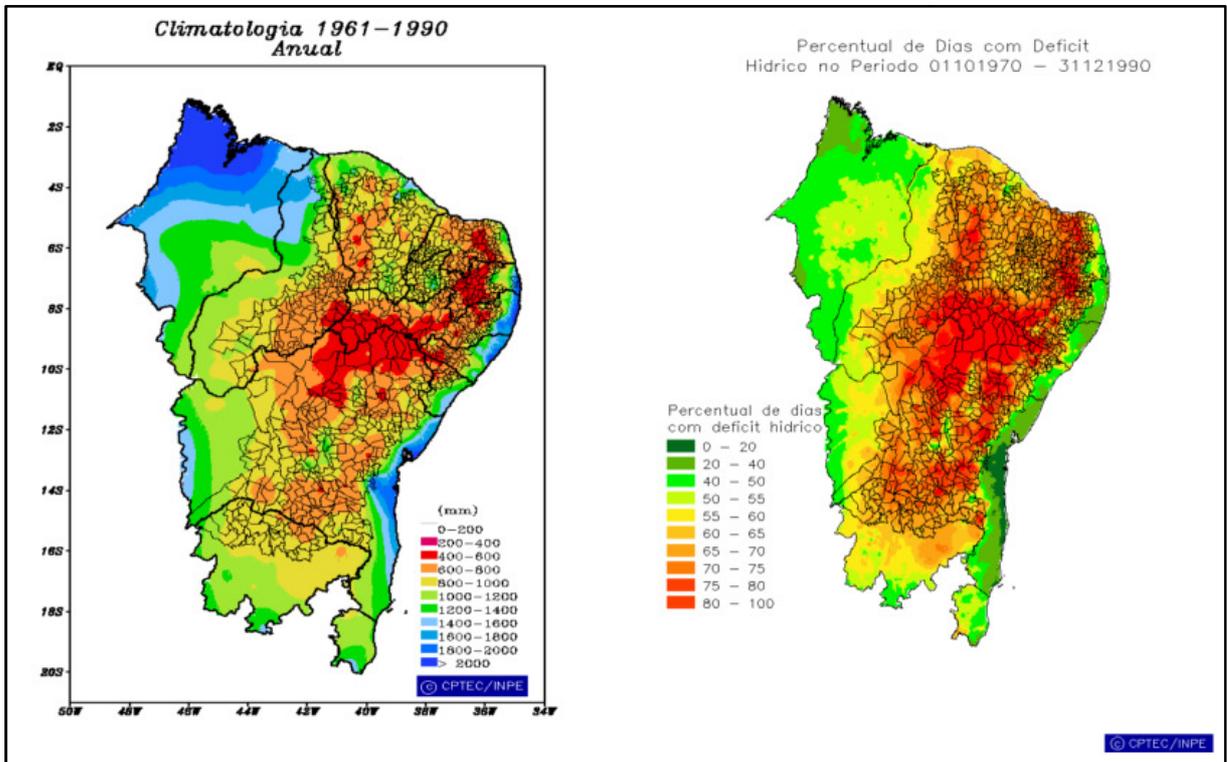
Fonte: CPC/NCEP

O setor norte do NEB, por sua vez, caracteriza-se pela ocorrência de secas periódicas e no setor leste pela ocorrência de cheias e enchentes, ciclos de estiagens e enchentes costumam acontecer em intervalos que pode variar de anos a décadas (MARENGO, 2006). A estação seca, na maior parte da região, ocorre nos meses de setembro e outubro; déficit hídrico acumulado ocorre praticamente durante todo o ano e o percentual de dias com déficit hídrico (relação entre o número de dias com déficit hídrico e o número total de dias) para o período 1970-90 pode ser utilizado como critério para avaliar a sua vulnerabilidade climática (MARENGO *et al.*, 2010). Essa análise indicou que em 70% do ano o semiárido apresenta déficit hídrico.

O NEB também é vulnerável às enchentes nos anos mais chuvosos. Em destaque os anos de 1964, 1967, 1974, 1985, 1986, 1988, 1989, 1994, 2004, 2009 e 2010. Exemplo dessa vulnerabilidade foi o que aconteceu em junho de 2010 em Pernambuco e Alagoas. As fortes chuvas foram causadas por um distúrbio ondulatório de Leste (Figura 4), que em apenas três dias a variação dos índices pluviométricos ficou entre 110 e 350 mm.

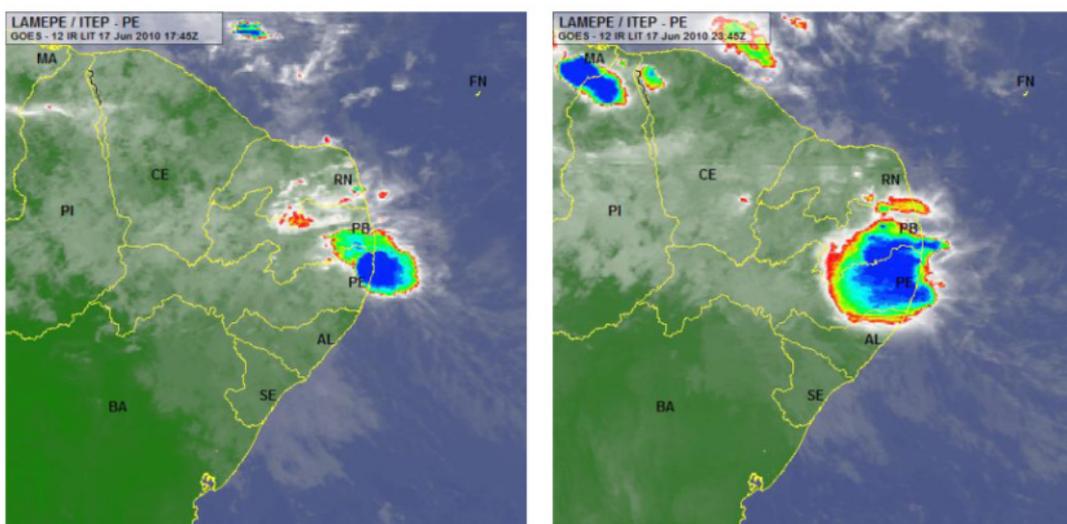
Os totais de chuva, acumulados foram, em média, 50% acima do esperado para todo o mês de junho e, provocaram uma das piores enchentes em ambos estados, quando cidades inteiras, casas, barragens e açudes foram destruídos e populações ficaram isoladas. Houve mortes de pessoas e de animais, além de grandes danos materiais e perdas significativas na produção (LACERDA *et al.*, 2010).

Figura 3 - Mapa das precipitações climatológicas (mm) com base no período de 1961 a 1990, para o Nordeste do Brasil com escala de cores e percentual de dias com déficit hídrico médio com base no período de 1970 a 1990 com escala de cores.



Fonte: Proclima/CPTEC/INPE

Figura 4 - Imagem do satélite meteorológico GOES 8 mostrando uma Onda de Leste ocorrida no dia 17 de junho de 2010



Fonte: Lacerda *et al.*, 2010

Outra característica marcante da precipitação, na região Nordeste do Brasil, é a alta variabilidade no tempo e no espaço; a ocorrência de chuvas, por si, não garante que as atividades agrícolas de sequeiro tenham sucesso (MARENGO *et al.*, 2011).

No semiárido é frequente a ocorrência de períodos secos durante a estação chuvosa que, dependendo da intensidade e da duração, provocam impactos nas culturas. O semiárido inclui diversos microclimas com características próprias, com alternância de anos secos, muitos secos e chuvosos. Destacam-se as secas de: 1710-11, 1723-27, 1736-57, 1744-45, 1777-78, 1808-09, 1824-25, 1835-37, 1844-45, 1877-79, 1982-83, 1997-98 e as chuvas intensas de 1924, 1974, 2004 e 2009 (MARENGO *et al.*, 2010).

Para melhor entender a variabilidade climática do NEB recomendam-se alguns clássicos da climatologia, tais como: Serra (1941), Namias (1972), Hastenrath e Heller (1977), Kousky (1979), Moura e Shukla (1981), Xavier (2001), Marengo (2003, 2007a), Silva Dias; Marengo (2002), Nobre *et al.*, (2006); IPCC (2007 a, b), Marengo; Silva Dias (2007), Marengo (2009), Silva *et al.*, (2004), entre outros.

A região Nordeste possui também como característica natural alto potencial para evaporação da água em função da enorme disponibilidade de energia solar e altas temperaturas. Aumentos da temperatura do ar, associados à mudança de clima, decorrentes do aquecimento global, independentemente do padrão de chuva, são suficientes para causar maior evaporação dos açudes e reservatórios e aumento da demanda evaporativa pelas plantas. A menos que haja aumento de chuvas, a água se tornará mais escassa (MARENGO *et al.*, 2010).

O estado de Pernambuco (Figura 5) é predominantemente semiárido em cerca de aproximadamente 80% seu espaço geográfico. No extremo oeste, a precipitação acumulada, em média, é inferior a 700 mm/ano, setor que abrange as mesorregiões do Sertão do São Francisco, de Petrolina até Araripina, tendo como principal período chuvoso os meses de janeiro a abril sempre afetado por secas, bem como, por enchentes.

Relatos de secas, em Pernambuco, podem ser encontrados a partir do século XVII, apresentando ocorrências de anos muito secos, sempre objeto de preocupação da sociedade e dos órgãos de governo ao longo dos anos. Essa preocupação está refletida na ação de construção de reservatórios hídricos, canais e, atualmente, na interligação de bacias hidrográficas, como é o caso do Projeto de transposição do rio São Francisco. Lacerda, *et al.*; 2010 mostraram, com séries históricas que remontam a década 1950, que a década de 2000, apresentou recordes históricos nos totais diários de chuva (Figura 6), especificamente, na

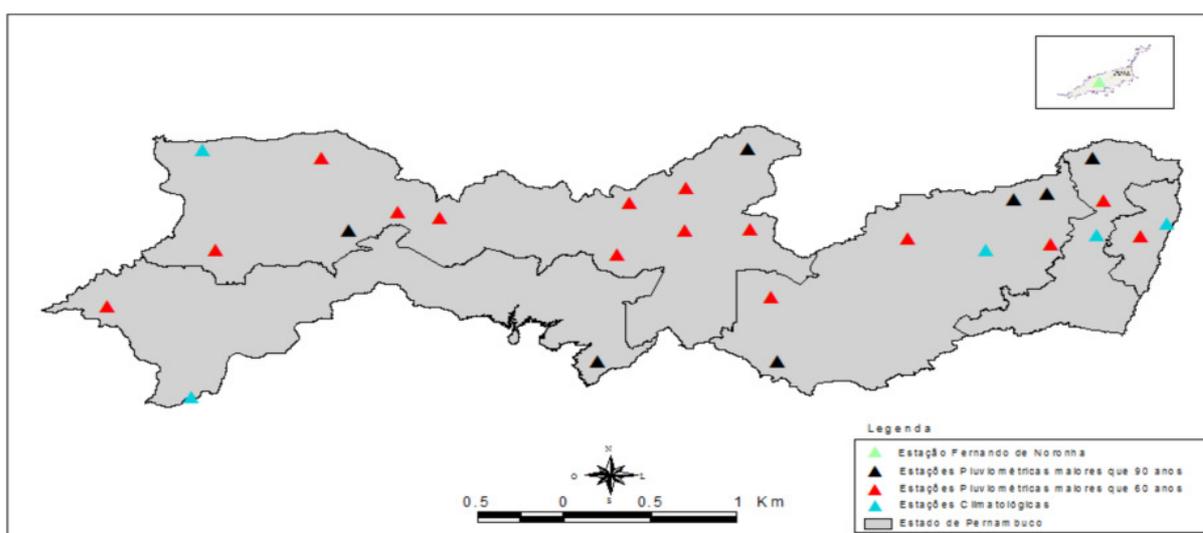
Região Metropolitana do Recife e nas Zonas das Matas Meridional e Setentrional de Pernambuco.

Tabela 1 - Anos de seca no Nordeste do Brasil e de ocorrência de El Niño nos últimos cinco séculos.

Século XVII	Século XVIII	Século XIX	Século XX	Século XXI
1603	1711	1804	1900	2001
1614	1721	1809	1902	2002-2003
1692	1723-24	1810	1907	2004-2005
	1736-37	1816-17	1915	2006-2007
	1744-46	1824-25	1919	2009-2010
	1754	1827	1932-33	2015
	1760	1830-33	1936	
	1772	1845	1941-44	
	1776-77	1877-79	1951	
	1784	1888-89	1953	
	1790-94	1891	1958	
	1790-94	1898	1970	
			1979-80	
			1981	
			1982-83	
			1986-87	
			1991-92	
			1997-98	

Fonte: MAGALHÃES *et al.*, 1988; Caviedes, 2001; atualizado pela autora para 2015.

Figura 5 - Mapa de Pernambuco com a localização dos postos pluviométricos.



Fonte: Mucliipe, 2008

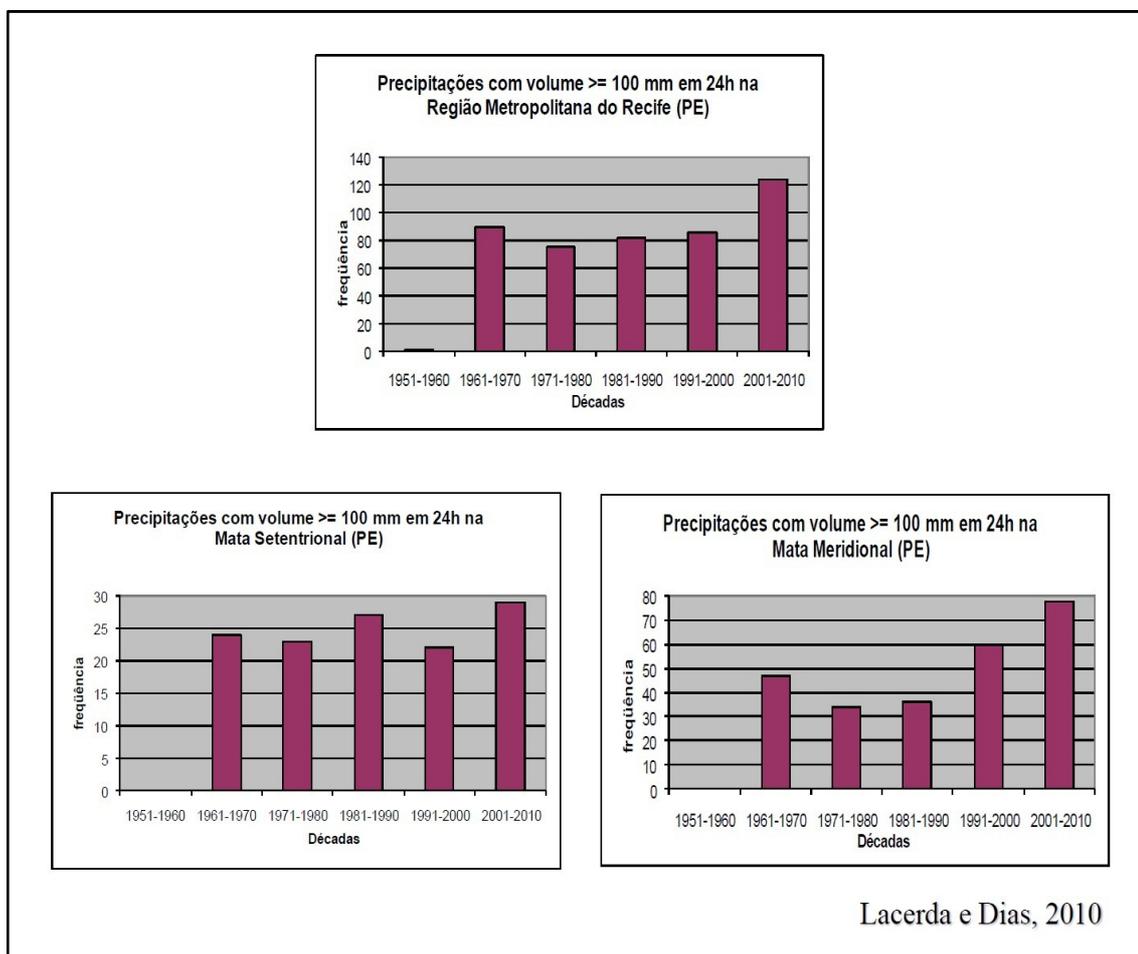
Um dos mais importantes sistemas meteorológicos, causador de chuva, no semiárido e em parte do Agreste de Pernambuco é o constituído pela Zona de Convergência

Intertropical (ZCIT), o qual apresenta convergência dos ventos alísios do Norte e do Sul, com movimentos ascendentes, baixas pressões, nebulosidade e chuvas abundantes, seguindo preferencialmente as áreas onde a Temperatura da Superfície do Mar TSM é mais elevada (KAYANO *et al.*, 2009).

No geral, é nos meses de janeiro a abril, no semiárido pernambucano, que ocorre a máxima precipitação que no geral está relacionada à atuação da ZCIT sobre o oceano Atlântico tropical, em sua posição mais ao sul, (4-5°S). Este fato revela que a ZCIT é o principal mecanismo responsável pelas chuvas no semiárido, principalmente, entre os meses de fevereiro a maio. Por outro lado, os mínimos de chuva acontecem entre junho a setembro, quando a ZCIT alcança sua posição climatológica (Figura 7), mais ao norte do equador, entre 4-5°N.

No Atlântico tropical o padrão espacial predominante do ciclo anual e da variabilidade interanual das TSM e dos ventos à superfície apresentam uma estrutura meridional mais articulada do que a estrutura zonal. As anomalias de TSM no Atlântico no sentido meridional são conhecidas como o dipolo do Atlântico (HASTENRATH; HELLER, 1977; MOURA; SHUKLA, 1981; NOBRE; SHUKLA, 1996; UVO *et al.*, 1998). Este dipolo propicia a ocorrência de gradientes meridionais de anomalias de TSM, os quais afetam fortemente a posição da ZCIT, influenciando a distribuição sazonal de precipitação pluviométrica, da parte norte do Nordeste do Brasil até a parte central da Amazônia (MARENGO; HASTENRATH 1993, NOBRE; SHUKLA, 1996, UVO *et al.*, 1998, MARENGO, 2004; SILVA *et al.*, 2004). Não obstante, as anomalias climáticas estarem relacionadas às variações da pressão ao nível médio do mar no Pacífico tropical leste e no Atlântico tropical, elas constituem o ajustamento de massa de grande escala associado ao fenômeno El Niño Oscilação do Sul-ENOS.

Figura 6 - Frequências de ocorrência das precipitações pluviométricas maiores do que 100 mm em 24 horas na Região Metropolitana do Recife, Zona da Mata Setentrional e Zona da Mata Meridional de Pernambuco.



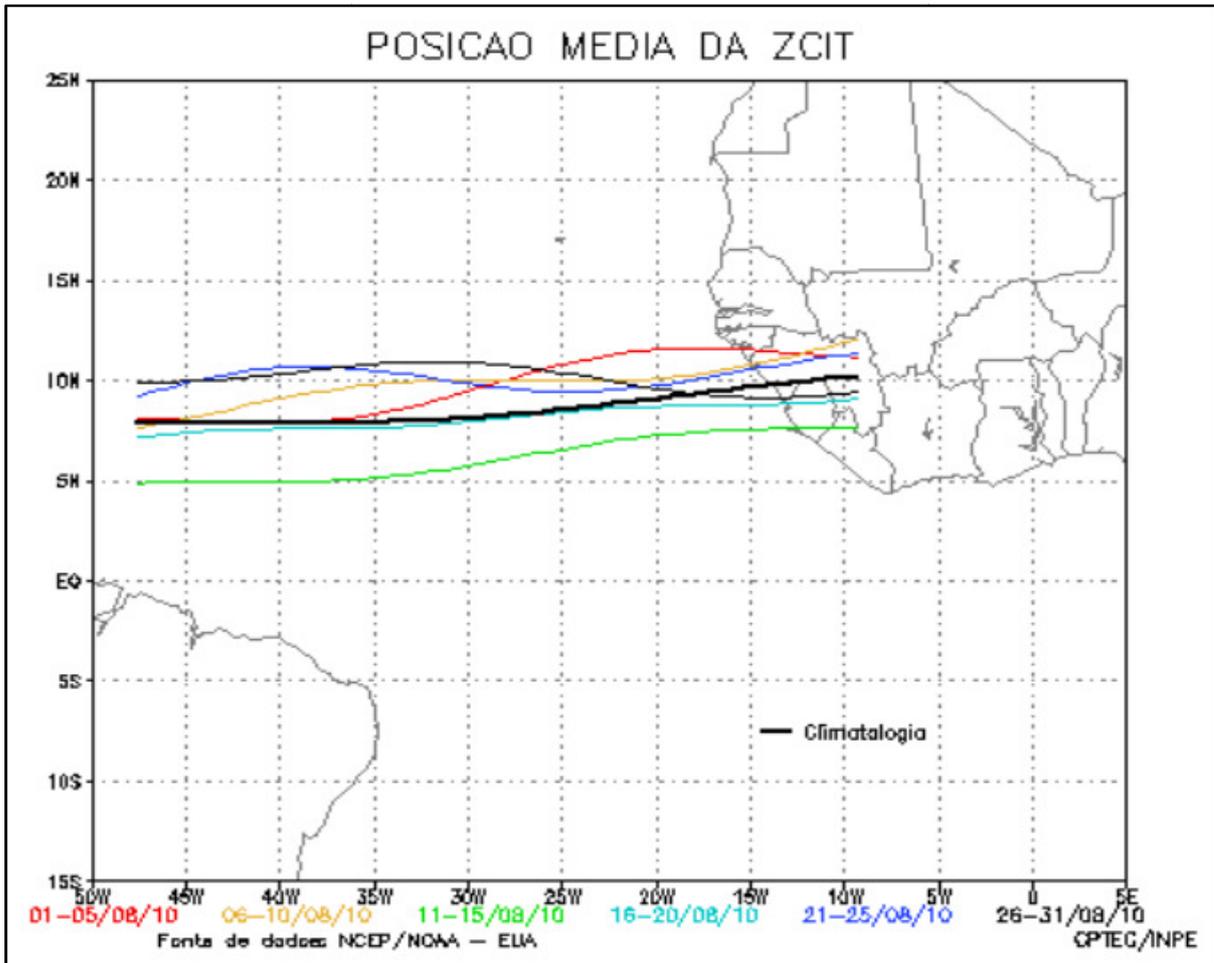
Fonte: Lacerda *et al.*, 2010.

Saravanan e Chang (2000) propuseram que as teleconexões do ENOS têm um papel importante na variabilidade climática do Atlântico tropical que, por sua vez, afeta o clima do Nordeste do Brasil. Wagner (1996), Nobre e Shukla (1996), estudaram as tendências decadais nos mecanismos que controlam o gradiente meridional de TSM sobre o Atlântico Tropical. Posteriormente, Hastenrath (2001) identificou a tendência de longo prazo na chuva do Nordeste, caracterizada por um deslocamento da ZCIT mais ao sul da sua posição climatológica.

Segundo Nobre *et al.*, (2003), a variabilidade interanual da pluviometria representa uma das características meteorológicas importantes nas regiões tropicais, sua previsibilidade é alta e as anomalias pluviométricas sobre os trópicos, na escala de tempo sazonal, é maior do que sobre latitudes temperadas. A temperatura da superfície do mar

(TSM), sobre os oceanos tropicais é um dos parâmetros que mais influenciam sua previsibilidade.

Figura 7 - Posição média da Zona de Convergência Intertropical, agosto de 2010.



Fonte: CPTEC/INPE

O regime pluviométrico da região Nordeste do Brasil (NEB) é fortemente afetado pelas anomalias de TSM sobre o Atlântico (HASTENRATH; HELLER, 1977; MOURA; SHUKLA, 1981; NOBRE; SHUKLA, 1994) e também sobre o Pacífico (ROPELEWSKI; HALPERT, 1987; ACEITUNO, 1988; HAMEED; MEINSTER, 1993).

A previsão climática sazonal pode ser realizada com alto grau de eficiência para algumas regiões do mundo, o que faz dela uma informação importante para o gerenciamento de recursos hídricos e planejamento agrícola em áreas de cultivo de sequeiro. A região Nordeste do Brasil é uma das regiões que apresentam alta previsibilidade da precipitação sazonal (NOBRE *et al.*, 2003).

Evidências observacionais e modelos de circulação geral da atmosfera mostram que as condições oceânicas e atmosféricas no oceano Atlântico Tropical influenciam a variabilidade interanual do clima sobre as Américas (HASTENRATH; HELLER, 1977; MOURA; SHUKLA, 1981; HASTENRATH, 1984; CHU, 1984; HASTENRATH, 1990; NOBRE; SHUKLA, 1996). Na América do Sul, as regiões mais influenciadas são o setor leste da Amazônia (MOLION, 1987; MOLION, 1993; NOBRE; SHUKLA, 1996) e o do Nordeste do Brasil (NAMIAS, 1972; HASTENRATH;HELLER, 1977; MARKHAM; MCLAIN, 1977; MOURA; SHUKLA, 1981; HASTENRATH, 1984; HASTENRATH, 1990; ALVES *et al.*, 1993; NOBRE, 1993; RAO *et al.*, 1993; NOBRE; SHUKLA, 1996).

Os Vórtices Ciclônicos em “Ar Superior Níveis” (VCAS), são fenômenos meteorológicos importantes. Têm grande influência sobre o clima do Nordeste brasileiro e de Pernambuco. A circulação de verão nos trópicos, particularmente sobre a América do Sul, desenvolve-se numa circulação em altos níveis da atmosfera, chamados de Alta da Bolívia (AB) que se apresentam associados a um cavado que podem eventualmente se fechar, dando surgimento aofenômeno chamado de VCAS do Nordeste. Suas variações de intensidade e posicionamento estão relacionadas com o total de precipitação, principalmente, nos meses de janeiro a março sobre a região (MARENGO, 2011, LACERDA *et al.*, 2010).

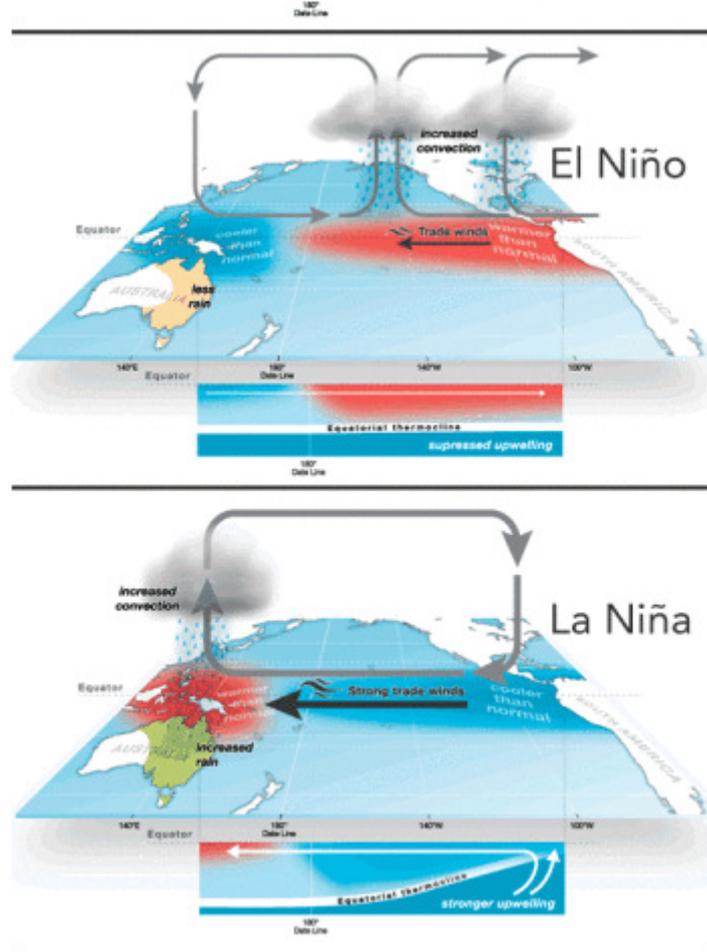
O El Niño é um fenômeno de escala global e de interação oceano-atmosfera que causa impactos significativos na precipitação sobre o Nordeste do Brasil, principalmente, no semiárido (ARAGÃO, 1986). O El Niño caracteriza-se pela alteração nos padrões das Temperaturas da Superfície do Mar (TSM), ou seja, anomalias positivas de TSM e alteração nos padrões dos ventos alísios no Pacífico Equatorial Tropical, entre a Costa do Peru e o setor oeste Pacífico Equatorial, próximo à Austrália. O El Niño modifica a circulação geral da atmosfera (Figura 8), causando movimentos descendentes anômalos sobre o leste da Amazônia e Nordeste do Brasil, gerando secas recorrentes (MARENGO *et al.*, 2011).

Ropelewski e Halpert (1987; 1989), Xavier (2001) e Xavier *et al.*, (2003) entre outros autores, mostraram que os episódios El Niño e La Niña causam impactos sobre a precipitação do Nordeste principalmente na quadra chuvosa (FMAM).

Registros de eventos de El Niño anteriores indicam que os episódios 1982/83 e 1997/98 (TRENBERTH, 1998) foram os mais intensos desde os inícios das medições, com anomalias da TSM chegando até 4°C e causando impactos severos na região semiárida do Nordeste. Um novo evento de ENSO, também de alta intensidade,se desenvolveu durante o ano 2015, no qual as anomalias de TSM atingiram valores superiores a 4°C

(setembro/2015), próximo à costa da América do Sul. Assim como o El Niño, a La Niña (Figura 8) também pode variar em intensidade causando excesso de precipitação como os eventos ocorridos em 1984/85 e 1988/89 (MARENGO *et al.*, 2011).

Figura 8 - Condições de El Niño e La Niña no Pacífico equatorial mostrando o sistema de acoplamento entre o oceano e a atmosfera durante cada evento especificamente.



Fonte: Australian Bureau of Meteorology

O fenômeno El Niño e o gradiente meridional de anomalias de TSM sobre o Atlântico Tropical modulam conjuntamente grande parte da variância interanual do clima sobre a América do Sul (NOBRE, 1996). No caso da variabilidade interanual das TSM e dos ventos sobre o Atlântico Tropical é significativamente menor do que a observada sobre o Pacífico Equatorial. Essas variáveis têm bastante influência na variabilidade das precipitações sobre a Região Nordeste do Brasil (HASTENRATH, 1984; NOBRE e SHUKLA, 1996).

Os episódios do fenômeno El Niño iniciam-se normalmente (classicamente) em meados de um determinado ano e atingem o seu ápice no final do mesmo ano e podem levar meses para se dissipar totalmente (MARENGO *et al.*, 2011). Em alguns anos, o fenômeno

ENOS, pode acontecer na época da estação chuvosa, no período de fevereiro a maio. Embora as distribuições de TSM sobre o Pacífico Equatorial tenham um efeito decisivo na pluviometria sobre o norte do Nordeste e leste da Amazônia, os fenômenos atmosféricos e oceânicos sobre o Atlântico Tropical são estatisticamente mais significativos para influenciar a variabilidade interanual das precipitações sobre o Nordeste do Brasil (CHU, 1984; HASTENRATH *et al.*, 1987).

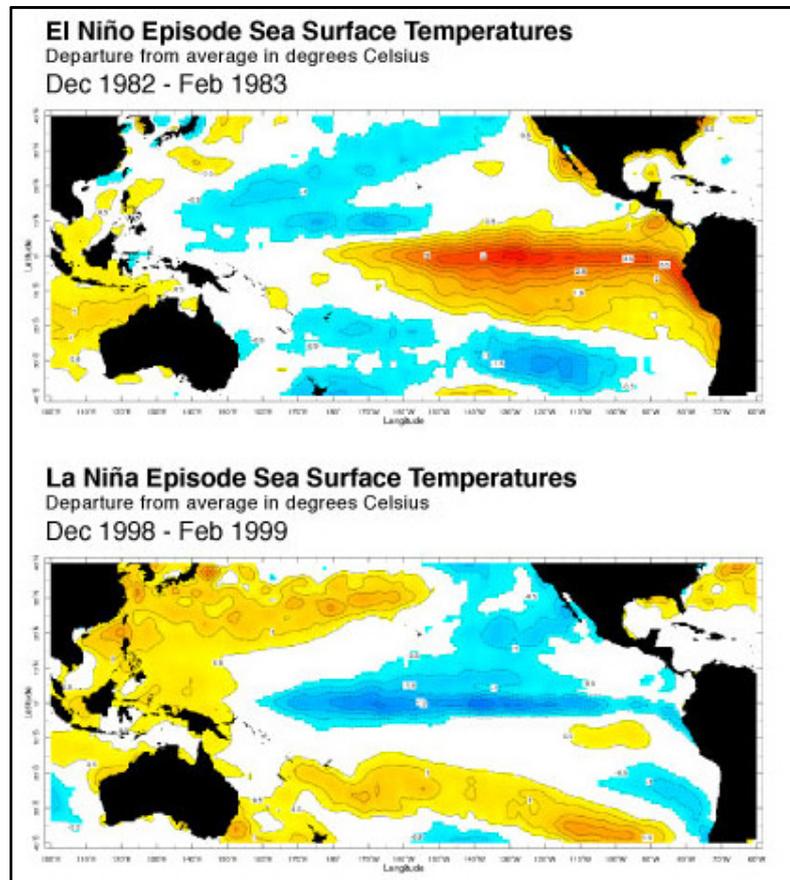
As relações entre os padrões anômalos de TSM no Atlântico com o clima do NEB foram documentadas por Hastenrath; Heller (1977). As variações interanuais da precipitação do Nordeste estão relacionadas à variabilidade do Oceano Pacífico Tropical (ENOS) com dois modos principais: Pacífico quente (El Niño) correspondendo a episódios de seca; Pacífico frio (La Niña) correspondente a anos com excesso de chuva (KOUSKY *et al.*, 1984; ROPELEWSKI; HALPERT, 1987; 1989).

O fenômeno La Niña caracteriza-se por apresentar um resfriamento anômalo das TSMs do Oceano Pacífico Equatorial (Ropelewski and Halpert, 1987, 1989). No geral, as anomalias associadas ao fenômeno La Niña (Figura 9) são contrárias as de anos de El Niño (Figura 9), ou seja, excesso de chuva na região Nordeste do Brasil, no setor norte e redução nas regiões Sul e Sudeste do Brasil (ARAGÃO, 1986).

Contudo, as anomalias de chuvas no Nordeste não se devem somente ao ENOS. Estudos observacionais e de modelagem numérica indicam que o Oceano Atlântico Tropical desempenha um papel significativo na chuva do Nordeste (MARENGO *et al.*, 2010).

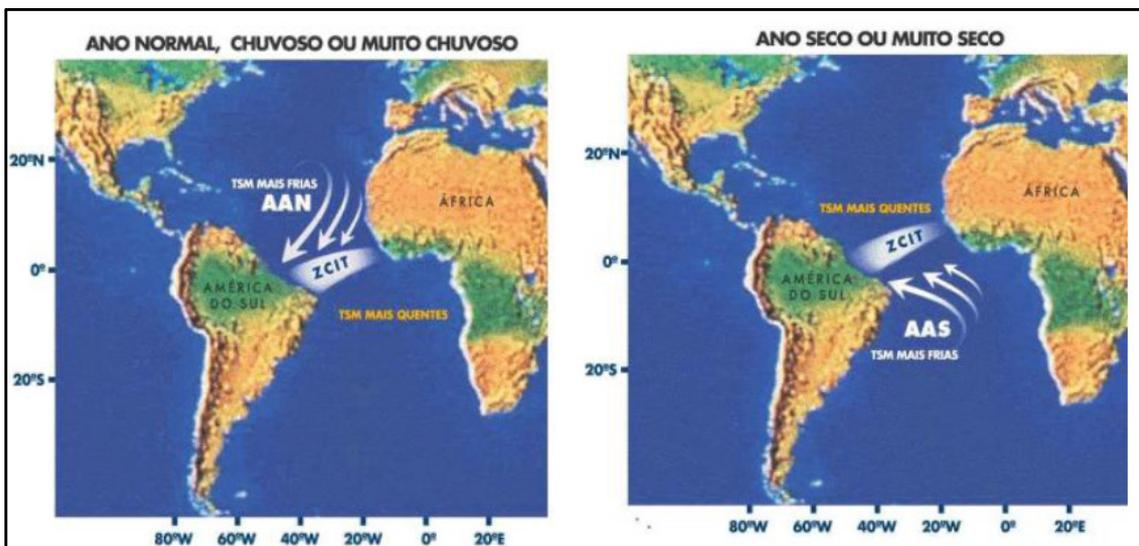
Na literatura essas disposições das anomalias de TSM sobre o Atlântico tropical estão normalmente associadas com as anomalias pluviométricas sobre o Nordeste e denominadas "padrão de dipolo" (Figura 10); apresentam anomalias de TSM com sinais opostos ao norte e ao sul do equador (HASTENRATH; HELLER, 1977; MOURA; SHUKLA, 1981). Esse padrão propicia a ocorrência de gradientes meridionais de anomalias de TSM, os quais impactam fortemente na posição latitudinal da ZCIT, modulando assim a distribuição sazonal das precipitações pluviométricas sobre o Atlântico Equatorial, parte norte do Nordeste do Brasil, até a parte central da Amazônia (NOBRE; SHUKLA, 1996).

Figura 9 - Anomalias das Temperaturas da Superfície do Mar-TSM durante um El Niño forte (acima) e La Niña (abaixo).



Fonte: IRI ENSO Maproom, 2015

Figura 10 - Esquema do padrão de dipolo sobre o Oceano Atlântico em anos normais, chuvosos, muito chuvosos, secos e muito secos.



Fonte: Funceme, 2000

Em anos nos quais as TSM sobre o Atlântico Tropical Sul (entre a linha do equador e 15S) estão mais altas do que a média nos meses de março-abril-maio (MAM) e o Atlântico tropical norte (entre 5N e 20N) está menos aquecido do que a média, há a formação de um gradiente meridional de anomalias de TSM no sentido de norte-sul (HASTENRATH 1984, 2001). Nessa situação observa-se concomitantemente a pressão ao nível do mar (PNM) mais baixa do que a média sobre o Atlântico sul e mais alta do que a média sobre o Atlântico norte. Essa situação se caracteriza ainda por ventos alísios de sudeste mais fracos do que a média e ventos alísios de nordeste mais intensos do que o normal, com totais pluviométricos acima da média sobre semiárido do Nordeste (HASTENRATH; HELLER, 1977).

Segundo Molion (1993) e Nobre e Shukla (1996) há evidências observacionais de que o padrão espacial das anomalias pluviométricas que causam secas ou inundações sobre o Nordeste do Brasil têm escala espacial muito maior do que o próprio Nordeste, englobando também o Atlântico equatorial até a parte central da Amazônia. Além disso, o excesso ou deficiência de precipitação ao sul do equador está associado não somente ao deslocamento latitudinal anômalo da ZCIT, mas principalmente à duração do período da incursão da ZCIT ao sul do equador (NOBRE *et al.*, 1989; NOBRE; SHUKLA, 1996).

Em anos chuvosos sobre o NEB, nos quais também chove acima da média sobre a Amazônia e Atlântico equatorial (MOLION, 1987; MOLION, 1993; NOBRE; SHUKLA, 1996) a ZCIT permanece ao sul de suas posições latitudinais médias até abril, enquanto em anos de seca a ZCIT pode retornar às posições mais ao norte do equador, em março.

Fica aqui evidenciada, nesse tópico, a correlação da precipitação pluviométrica no norte do Nordeste Brasil com as anomalias de TSM no Atlântico tropical e Pacífico equatorial.

2.4 PROCESSO DE DESERTIFICAÇÃO EM PERNAMBUCO

As áreas suscetíveis à desertificação no Brasil abrangem o trópico semiárido, subúmido seco e áreas de entorno, ocupando cerca de 1.340.000 km² e atingindo diretamente 30 milhões de pessoas (MMA, 2007). Desse total, 180 mil km² já se encontram em processo avançado de desertificação, concentrados principalmente nos estados do Nordeste, que têm 55,25% do seu território atingido em diferentes graus de deterioração ambiental. Processos de causas naturais e antrópicas, a degradação das terras e a desertificação trazem consigo consequências dramáticas e, em muitos casos, de difícil recuperação, gerando altos custos sociais, econômicos e ambientais.

A desertificação é definida como um processo de degradação ambiental causado pelo manejo inadequado dos recursos naturais nas áreas subúmidas secas, semiáridas e áridas, onde há comprometimento dos sistemas produtivos, dos serviços ambientais e da conservação da biodiversidade (BRASIL, 2004).

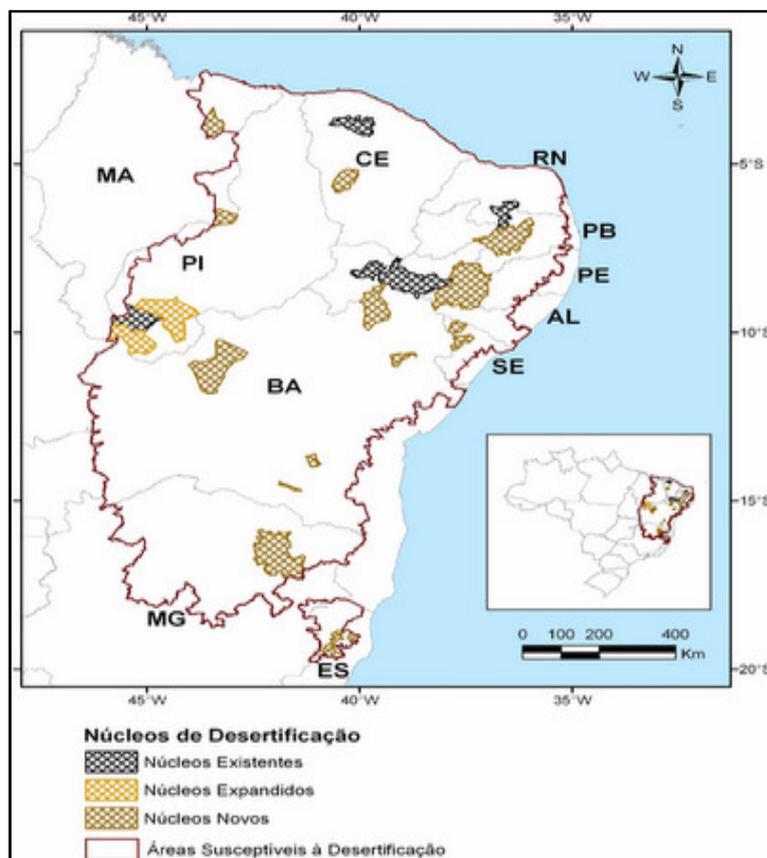
No Brasil, áreas em processo e/ou suscetíveis à desertificação estão localizadas no Nordeste e em parte do sudeste, nas áreas de clima semiáridos e subúmidos secos. Cerca de 1,13 milhão de km², dos quais 710 mil km² (62,8 %) são caracterizados como semiáridos e 420 mil km² (37,2 %) como subúmidos secos. Essas áreas se espalham por 1.480 municípios susceptíveis a esse processo que pode ser agravado pela variabilidade climática. Nesse contexto, a desertificação significa a destruição da base de recursos naturais, como resultado da ação do homem sobre o meio ambiente e, também, por fenômenos naturais (BRASIL, 2004).

Relacionados aos fatores humanos, destacam-se o desmatamento, a extração excessiva de produtos florestais, os incêndios florestais, a sobrecarga animal, o uso demasiadamente intensivo do solo e o manejo inadequado e, por último, o emprego de tecnologias não apropriadas para os ecossistemas frágeis (SÁ *et al.*, 1994). As áreas suscetíveis ao processo de desertificação representam 16% do território brasileiro, em 27% dos municípios, envolvendo uma população de mais de 30 milhões de habitantes.

A situação mais grave, no Brasil, é no Seridó, no Rio Grande do Norte, na divisa com a Paraíba, com 2,3 mil km²; nos municípios de Irauçuba, no Ceará, com 4 mil km², Gilbués, no Piauí, com 6,1 mil km², e Cabrobó, em Pernambuco, com 5,9 mil km² (BRASIL, 2004). Há ainda outros que caminham para o mesmo destino, como por exemplo, no Cariri da Paraíba, no Sertão da Bahia e em Canindé, no Ceará. Adicionando-se as áreas suscetíveis à desertificação, são cerca de 1,34 milhão de km², ou 15,72% do território nacional, que já estão ou que correm risco de se transformar em deserto (Figura 11) (MMA, 2007).

Segundo Giongo (2011), a história do semiárido passa pelo entendimento do bioma Caatinga e pela necessidade de se trabalhar com medidas mitigatórias e adaptativas, no atual contexto das mudanças climáticas globais – também inferidas pelo balanço de carbono – fazendo um resgate das relações socioeconômicas e políticas, que se estabeleceram no Nordeste, preteritamente, descritas por Euclides da Cunha, Manuel Correia Andrade, Vasconcelos Sobrinho, entre outros.

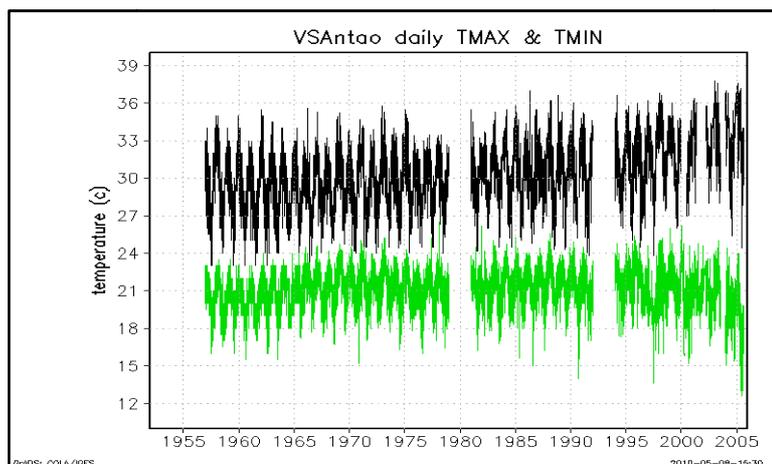
Figura 11 - Mapa do Nordeste do Brasil delineando a área susceptível ao processo de desertificação.



Fonte: SEMAS/PE, 2007

Considerando as variações climáticas do NEB, ante os cenários de mudança do clima atual e futuro, sendo o NEB altamente vulnerável em termos de reduções de chuvas e aumento das temperaturas, prever a ocorrência de grandes períodos de seca no semiárido e apontar as áreas suscetíveis ao processo de desertificação desencadeado por mudanças climáticas é essencial. Segundo Marengo (2008), a área mais afetada no Nordeste, será o Oeste do Piauí, o Sul do Ceará, o Norte da Bahia e Oeste de Pernambuco, onde se encontram os municípios com menor Índice de Desenvolvimento Humano-IDH. Nesses locais, as projeções declina para o futuro indicam riscos de secas de 10 anos ou mais. Dados do extinto Laboratório de Meteorologia de Pernambuco (Lamepe) revelaram que a temperatura máxima do ar teve um aumento substancial nos últimos 45 anos, ultrapassando os 3°C, nas estações experimentais do Instituto Agrônomo de Pernambuco – IPA, localizadas nos municípios de Vitória de Santo Antão e de Araripina (Figuras 12 e 13) (NOBRE, 2011).

Figura 12 - Evolução temporal das temperaturas (°C) máximas (preto) e mínimas (verde) em Vitória de Santo Antão, Pernambuco.

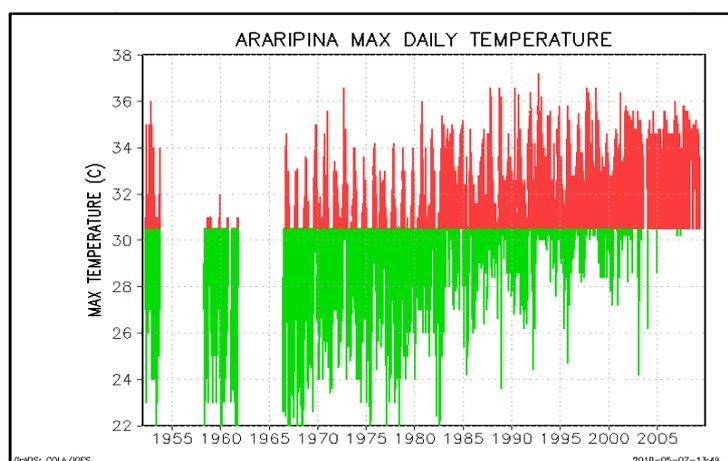


Fonte: Nobre, 2011

No caso de Araripina, a distribuição temporal das temperaturas extremas, mostra um aumento significativo dos valores extremos das temperaturas máximas diárias (Figura 13).

Por outro lado, a distribuição das séries temporais das temperaturas máximas e mínimas, em Vitória de Santo Antão (Figura 12), sugere um padrão de amplitude térmica característico de regiões em processo de desertificação, onde as temperaturas máximas aumentam enquanto que as mínimas diminuem (LACERDA *et al.*, 2010). Com a crescente influência do aquecimento global nos processos dinâmicos e termodinâmicos atmosféricos, oceânicos e dos biomas, torna-se imprescindível aumentar o conhecimento sobre esses processos e suas interações.

Figura 13 - Evolução temporal das temperaturas (°C) máximas diárias em Araripina, Pernambuco.



Fonte: Nobre, 2011

No caso da desertificação, mais de 90% do território semiárido de Pernambuco pode estar ameaçado (MMA, 2007) e as inundações decorrentes do aumento do nível do mar podem afetar grande parte da região metropolitana do Recife. Nas áreas identificadas como susceptíveis à desertificação, no Nordeste e em Pernambuco, foi constatado que o fator antropogênico é o que mais contribui para a intensa degradação. De maneira geral, foi a substituição do bioma Caatinga por práticas agrícolas inadequadas, pela pecuária e desmatamento objetivando uso da madeira para produção de lenha e carvão. Fatores tais como a mineração e a extração de argila de solos aluviais também foram identificados (MMA, 2007).

Uma atmosfera mais aquecida proporciona maior quantidade de vapor d'água e, como o vapor d'água também é GEE, irá aumentar ainda mais a temperatura do ar. Essa condição ocasiona alteração no ciclo hidrológico que tenderá a ocasionar precipitações pluviométricas mais intensas, aumentando o escoamento superficial e gerando a erosão dos solos, assoreamento das calhas dos rios e reservatórios, aumento da frequência das enchentes e das inundações (NOBRE, 2011). O aumento da temperatura também tem suas consequências na diminuição da umidade do solo, como consequência do aumento da evapotranspiração. Os efeitos do aquecimento global devem agravar a condição de semiaridez tornando-se cada vez mais inviável a prática agrícola no semiárido do Nordeste do Brasil (MARENGO *et al.*, 2011).

Estudos dos impactos das mudanças climáticas na estabilidade dos biomas brasileiros (OYAMA; NOBRE, 2003), revelam que o bioma Caatinga está entre os mais vulneráveis num cenário de aumento das temperaturas globais, o que coloca a região em alerta, uma vez que os efeitos das mudanças climáticas representam fatores a mais em relação à pressão de origem antrópica à desertificação. Esses fatores somados aos efeitos das mudanças climáticas fazem do Nordeste uma região factível a um rápido aumento das áreas que estão em processo de desertificação, as chamadas áreas suscetíveis à desertificação (ASD). Na região, as consequências sobre o ciclo hidrológico são drásticas, pois o aumento da temperatura do ar ocasiona o aumento da evaporação e da evapotranspiração, acarretando aumento da deficiência hídrica (NOBRE *et al.*, 2005). De fato, há essa tendência à desertificação na porção semiárida, até final do século XXI, como consequência do aumento da temperatura do ar e redução das chuvas (OYAMA *et al.*, 2004) com a prática agrícola de sequeiro de alto risco, ainda mais marginal.

No caso do semiárido de Pernambuco, há evidências no aumento das chuvas torrenciais e concentradas em curtos espaços de tempo (LACERDA *et al.*, 2010). Também, espera-se uma maior frequência de dias secos consecutivos e de ondas de calor decorrente do aumento na frequência de veranicos na região (MARENGO *et al.*, 2011).

Esse processo, além de ameaçar espécies (vegetais e animais) e os ecossistemas, ameaça a segurança hídrica das populações, podendo levá-las, principalmente aquelas que habitam o semiárido, a se tornarem refugiados do clima. Considerando um semiárido mais árido as atividades humanas estarão comprometidas, sendo provável que aumente o deslocamento da população rural, que habita no semiárido para as cidades (MARENGO *et al.*, 2011; LACERDA *et al.*, 2014), isso resultará num aumento das áreas com alto risco climático na região.

Segundo Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas - PBMC (PBMC, 2013), os resultados das projeções regionalizadas do clima futuro nos biomas brasileiros, considerando os períodos de início (2011-2040), meados (2041-2070) e final (2071 - 2100) o cenário futuro de aquecimento global, com baixa ou alta emissão de GEE, podem oscilar entre ~5% e ~20% em redução da precipitação e ~1°C e ~5°C de aumento na temperatura. Os cenários futuros do clima também sugerem aumento dos eventos extremos de secas e estiagens, principalmente, nos biomas Amazônico, Cerrado e Caatinga. Tais mudanças estão previstas de forma mais acentuada a partir da metade e final do século XXI. Em relação às temperaturas do ar, todas as projeções indicam condições de clima mais quente. As projeções oriundas da modelagem climática global e regional para a Caatinga são de aumento de 0,5° a 1°C da temperatura do ar e decréscimo entre 10% e 20% da precipitação durante as próximas três décadas (até 2040), aumento de temperatura de 1,5° a 2,5°C e diminuição entre 25% e 35% da precipitação para o período de 2041-2070.

Para o final do século (2071-2100) as projeções indicam aumento de temperatura entre 3,5° e 4,5°C, bem como, agravamento do déficit hídrico regional com diminuição de 40 a 50% da precipitação pluviométrica no semiárido. Enquanto a questão dos impactos das mudanças climáticas nas economias locais, no meio ambiente e nas estruturas políticas e sociais, não for equacionada o conhecimento científico evolui lentamente sobre suas causas e efeitos mitigatórios. Um desses efeitos é o das florestas tropicais estabilizando o clima (NOBRE *et al.*, 2009).

2.5 TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS E VARIABILIDADE HÍDRICA

Neste tópico foram levantados vários estudos de tendências climáticas e impactos da mudança do clima, principalmente no que diz respeito aos recursos hídricos no Nordeste do Brasil. Um dos principais impactos conhecidos do aquecimento global é a alteração do ciclo hidrológico em grande escala (PBMC, 2013). Essas alterações podem ser observadas pelo aumento do vapor d'água na atmosfera; alteração nos padrões de chuva (intensidade e frequência); redução dos glaciais e derretimento da cobertura de gelo, mudança no padrão da umidade do solo.

Bates *et al.*, (2008), ponderam que as alterações do clima tendem a alterar a quantidade e a qualidade da água, no semiárido, com consequências significativas na produção de alimentos, aumento do risco nas práticas da agrícolas de sequeiro. Há tendências de crescimento da propagação de doenças de veiculação hídrica (KABAT *et al.*, 2002) como também de problemas de abastecimento, operação de infraestrutura hídrica e práticas de gestão da água associadas à diminuição dos recursos hídricos no Nordeste do Brasil (KUNDZEWICZ *et al.*, 2007). Estudos observacionais têm documentado uma diminuição da precipitação total anual sobre os trópicos e um aumento na ocorrência de episódios de precipitação intensa (TRENBERTH *et al.*, 2007; KHARIN *et al.* 2007).

No entanto, as consequências do aquecimento global nos trópicos são, basicamente, o aumento da temperatura, evaporação e evapotranspiração, com possíveis impactos sobre o ciclo hidrológico e disponibilidade de água (LAU; WU 2007). O cenário de mudanças climáticas no Brasil é semelhante (MARENGO *et al.* 2007; MARENGO *et al.*, 2011). Estudos têm demonstrado tendências de longo prazo de aumento de chuva extrema e uma redução da precipitação anual total no Nordeste durante o século XX (CHAPLOT, 2007). Em áreas com ecossistemas frágeis e vulneráveis, como o Nordeste semiárido, as mudanças climáticas mais drásticas podem ocorrer como consequência do aumento de GEE associados com o desmatamento (SANTOS; BRITO, 2007).

Avalia-se também o conhecimento de mudanças de clima e os seus impactos na disponibilidade de água no futuro, considerando estudos de tendências de longo prazo nos últimos anos e as projeções dos modelos climáticos (TRENBERTH *et al.*, 2007; MAGRIN *et al.*, 2007; BATES *et al.*, 2008; MARENGO *et al.*, 2007; AMBRIZZI *et al.*, 2007; SALATI *et al.*, 2007; METZ, *et al.*, 2007). Marengo (2008) avaliou que as vazões dos rios no Brasil (Amazônia, Sul do Brasil, Norte do Nordeste) apresentam altas correlações com os campos de anomalias de temperatura de superfície do mar nos oceanos Pacífico e Atlântico tropical.

Segundo os relatórios do IPCC (MAGRIN *et al.*, 2007) e do INPE (MARENGO *et al.*, 2007; AMBRIZZI *et al.*, 2007), o semiárido tenderá a tornar-se mais árido. Está previsto o aumento, frequência e intensidade das secas e, com impactos na redução da disponibilidade dos recursos hídricos, na vegetação, na biodiversidade e outras atividades que dependam dos recursos naturais (MARENGO, 2008).

O quinto relatório do IPCC (AR5) reforça cientificamente a relação entre a atividade humana e o aumento médio da temperatura global, aponta consequências caso a temperatura do planeta suba além dos 2°C até o ano 2100. Em relação aos cenários futuros do clima, a previsibilidade das precipitações é um dos fatores limitantes, já que há falta de concordância dos modelos climáticos em grande parte do território brasileiro (PACHAURI; REISINGER, 2007).

As incertezas advindas dos cenários de pluviosidade, bem como a própria variabilidade climática da precipitação, em escalas anual, interanual ou decenal exigem estratégias de adaptação e gestão de riscos em recursos hídricos (PBMC, 2013). As atuais práticas serão insuficientes para reduzir os impactos da mudança do clima acerca da garantia do abastecimento de água, riscos de inundação, saúde, energia, e ecossistemas aquáticos. A utilização de estratégias de gestão dos recursos hídricos associadas à variabilidade climática facilitaria a adaptação à mudança do clima futuro (KUNDZEWICZ *et al.*, 2007).

Segundo Hulme e Carter (1999), as pesquisas na área de clima devem aumentar o entendimento do sistema climático e quantificar as incertezas como suporte às estratégias de adaptação e gestão de risco. Para enfrentamento aos impactos, às mudanças climáticas, em recursos hídricos, sugere-se aprimoramento dos métodos e das práticas, tendo em vista os atuais desafios (PBMC, 2013), onde as variáveis hidrológicas não podem mais ser consideradas estacionárias (MILLY *et al.*, 2008). Os usos múltiplos da água nas cidades e no campo são influenciados pela temperatura do ar, pluviosidade entre outras variáveis meteorológicas.

As alterações do clima afetam diretamente os recursos hídricos tanto na demanda quanto na oferta (KABAT *et al.*, 2002), as consequências e alterações da variabilidade climática não são integralmente consideradas nas políticas de recursos hídricos e nem nos processos de tomada de decisão. Isso acontece, particularmente, nos países em desenvolvimento, onde os impactos humanos, ecológicos e financeiros são maiores e os recursos hídricos já se encontram em situação de grande estresse (KABAT *et al.*, 2002), o que limita a capacidade de adaptação às mudanças do clima.

A combinação das alterações do clima, na forma de diminuição da chuva acompanhada por extremos de temperatura e altas taxas de evaporação, além da alta competição pelos recursos hídricos, podem gerar uma crise sem precedentes. Nesse caso, os mais vulneráveis serão os agricultores e a população do semiárido no Nordeste do Brasil.

O Brasil tem uma economia fortemente influenciada pelo clima com relação à agricultura e à geração de energia elétrica, como também, populações que estão submetidas a eventos climáticos extremos, tais como, as secas severas que ocorrem no semiárido nordestinoos deslizamentos de encostas e inundações sobre as populações que habitam nos centros urbanos (FREITAS, 2005; FREITAS e SOITO, 2008).A maioria dos impactos relacionados aos eventos climáticos extremos é caracterizada quando atingem algum nível crítico e afetam o desempenho ou comportamento de um sistema físico ou biológico (IPCC, 2001). As avaliações da ocorrência de eventos extremos são reguladas por incertezas, devido ao número limitado de dados meteorológicos históricos para a realização dos estudos estatísticos e probabilísticos(FREITAS e SOITO, 2008).

Os cenários brasileiros indicam uma maior frequência e intensidade na ocorrência dos eventos extremos de curta duração, associados ao aquecimento global como secas, chuvas intensas, ondas de frio e calor, vendavais, furacões, inundações e ressacas (MARENGO *et al*, 2007, 2009 a, b; TEBALDI *et al.*, 2006).

As forçantes climáticas e não-climáticas influenciam a quantidade de água disponível de uma bacia hidrográfica (IPCC, 2007a). As forçantes relacionadas ao clima são a precipitação, a temperatura e a evaporação e as não-climáticas são uso do solo, lançamento de poluentes e o consumo de água (PBMC, 2013). Estudos mostram que as TSMs no oceano Pacífico equatorial tropical, influenciam o regime hidrológico do Nordeste do Brasil, Leste da Amazônia e Sul do Brasil (KOUSKY *et al.*, 1984; KAYANO *et al.*, 1988; ROPELEWSKI; HALPERT, 1987 e 1989).

É possível prever com alguns meses de antecedência o regime de chuvas, no Nordeste do Brasil (MOURA; SHUKLA, 1981; SERVAIN, 1991), tomando como base o conhecimento e a evolução da dinâmica da atmosfera combinado com o uso de modelos de previsão climática (HASTENRATH, 1990; HASTENRATH; GREISHAR, 1993; ALVES *et al.*, 1995, ALVES *et al.*, 2005; ALVES *et al.*, 2006, SUN *et al.*, 1999; SUN *et al.*, 2007). As forçantes não-climáticas influenciam os recursos hídricos pela mudança do uso do solo, construção de reservatórios e emissão de poluentes (IPCC, 2007a). As alterações na cobertura vegetal das bacias hidrográficas naturais ou artificiais influenciam o comportamento

hidrológico (TUCCI; CLARKE, 1998; TUCCI, 2003; ZHAO *et al.*, 2010). Os impactos oriundos das alterações do clima sobre a água dos rios, lagos etc. agravam-se com crescimento populacional, mudança de atividade econômica, uso da terra e urbanização (PBMC, 2013).

As modificações causadas pela ação humana sobre o planeta tem alterado a estrutura química da atmosfera e dos oceanos (NOBRE *et al.*, 2008). O desmatamento e a irrigação também causam alterações no ciclo hidrológico com quantidades equivalentes de diminuição nos fluxos de vapor d'água para a atmosfera. Segundo Gordon *et al.*, 2005, no caso do desmatamento esse valor chega a 4% e com a irrigação a 3,5%. Sugerem ainda que em função das mudanças no ciclo hidrológico e uso do solo, provocadas pelo desmatamento e pela irrigação, com aumento do vapor de água na atmosfera, o desenvolvimento da produção agrícola em uma região pode afetar outras.

O conhecimento da disponibilidade hídrica é importante para quantificar os impactos da mudança do clima viabilizando a adaptação. A disponibilidade hídrica está associada a diversos setores econômicos, fazendo com que eventuais alterações climáticas aumentem as pressões antrópicas sobre o uso sustentável da água (BATES *et al.*, 2008). Há preocupação com relação aos impactos das mudanças climáticas em relação à disponibilidade hídrica tanto pelo consumo, como pela manutenção dos ecossistemas (BATES *et al.*, 2008).

Estudos da Fundação de Desenvolvimento Sustentável (SALATI *et al.*, 2009) mostraram que os cenários climáticos irão provocar redução de excedente hídrico em todas as grandes bacias brasileiras. Nesse estudo foi utilizada a média de 15 modelos climáticos do IPCC para os cenários B1 e A2 e para o modelo regional HadRM3P. As incertezas em relação aos cenários futuros do clima representam por vezes obstáculos à implementação de ações de mitigação e de adaptação (PARRY *et al.*, 2007). Espera-se que, ao longo deste século, a disponibilidade dos recursos hídricos diminua, devido ao clima ou as ações antrópicas.

A intensidade da alteração na disponibilidade hídrica varia de acordo com as especificidades locais, visto que as bacias hidrográficas possuem características próprias respondendo de forma distinta (TUNDISI, 2008). Segundo Souza Filho *et al.*, (2003), a oferta hídrica é estabelecida pelo comportamento médio e pela variabilidade do regime hidrológico que é influenciada pelos eventos extremos do clima tais como secas e cheias como também, pela avaliação do comportamento médio da oferta hídrica, sua tendência e padrões de variação que são importantes para estimar a disponibilidade hídrica futura.

Estudos realizados para identificação de tendências em bacias hidrográficas e em áreas do Nordeste brasileiro mostraram aumento e redução das precipitações pluviométricas (WAGNER, 1996; HASTENRATH; GREISCHAR, 1993; SANTOS; BRITO, 2007; SANTOS et al., 2009; MONCUNILL, 2006, LACERDA *et al.*, 2009), no longo prazo.

Estudos realizados por Lacerda *et al.*, (2009a) na microrregião do Pajeú, no Sertão de Pernambuco, mostraram que há aumento dos dias secos, do tamanho médio dos veranicos e dos máximos veranicos. Além disso, as análises das tendências das séries de precipitação evidenciaram que as precipitações extremas, o tamanho dos máximos dos veranicos estão aumentando. Os autores, nesse artigo, definiram veranico como sendo o número de dias consecutivos sem chuva considerando todos os valores da série menores ou iguais a 5 mm, a justificativa em adotar esse critério, foi devido ao fato de que a evapotranspiração média no semiárido pernambucano, é superior a esse valor (LACERDA et al., 2015), em praticamente todos os meses do ano. Para o Sertão de Pernambuco, Lacerda *et al* (2009a) identificaram uma diminuição das precipitações na maioria dos postos pluviométricos instalados na área da bacia do Pajeú.

Marengo (2007a) mostrou que desde a década de 70 há uma queda sistemática nas vazões do Rio São Francisco, utilizando as séries históricas de pluviosidade, em Sobradinho. As precipitações pluviais e as vazões fluviais na Amazônia e no Nordeste apresentam uma variabilidade interanual e interdecadal. As variabilidades das precipitações e das vazões são mais significativas do que as tendências de aumento ou redução (SOUZA FILHO, 2003; SOUZA FILHO *et al.*, 2008; MARENGO 2007b). Por outro lado, Marengo e Valverde (2007) mostraram que a tendência não é estatisticamente significativa. Para o Rio São Francisco, as séries históricas de pluviosidade em Sobradinho, mostram quedas sistemáticas nas vazões, desde 1979 (MARENGO, 2007b). Tröger *et al.*, (2006), que pesquisou a estacionariedade das séries históricas de vazões fluviais naturais das usinas hidrelétricas de Três Marias e Sobradinho, no período 1931-2001, rejeitou a hipótese de estacionariedade da série de vazões médias anuais naturais dos reservatórios estudados.

As precipitações pluviais e as vazões na Amazônia e no Nordeste apresentam uma variabilidade interanual e interdecadal, mais significativas do que as tendências de aumento ou redução (DATSENKO *et al.*, 1995; SOUZA FILHO, 2003; MARENGO; VALVERDE, 2007, MARENGO, 2004). Nesse caso, o estudo concluiu que a variabilidade sazonal das precipitações está associada aos padrões de mudança, na escala temporal dos oceanos Pacífico e Atlântico, associadas com a variabilidade interanual do El Niño-ENOS, à variabilidade

decadal do Pacífico (PDO Pacific Decadal Oscillation), no Atlântico (NAO - North Atlantic Oscillation) e Atlântico tropical sul (GUEDES *et al.*, 2006; MARENGO e VALVERDE, 2007). As análises da não-estacionariedade das séries hidrológicas demandam informações sobre tendências e padrões de variação de baixa frequência do clima (décadas a séculos) (PBMC, 2013; MILLY *et al.*, 2008).

Segundo Cane(2010) as previsões climáticas decadais devem tentar cobrir a lacuna entre a previsão sazonal/interanual com prazos de dois anos ou menos e projeções de mudanças climáticas de um século à frente. Não há nenhuma teoria amplamente aceita para este tipo de previsão e não se sabe se a sua evolução passada é a chave para seu futuro (CANE, 2010). No entanto, os hidrólogos têm procurado desenvolver cenários de vazões considerando as variabilidades em suas várias escalas (DETTINGER *et al.*, 1995;. GHIL; VAUTARD, 1991; KEPPELNE; GHIL, 1992a; KEPPELNE; LALL, 1996; SOUZA FILHO *et al.*, 2008). As simulações futuras do clima (IPCC, 2007 a, b) e Relatório de Clima do Inpe, em 2007 (MARENGO *et al.*, 2007a;b; AMBRIZZI *et al.*, 2007) já evidenciava cenários de secas e extremos de chuvas para o Brasil.

Reduções de volumes de chuvas aparecem na maioria dos modelos globais do IPCC AR5, até segunda metade do século XXI, com áreas mais secas e aumento do déficit hídrico (IPCC, 2013). Segundo Trenberth *et al.*, (2007) observa-se globalmente diminuição dos totais pluviométricos anuais nas áreas tropicais entre 10S e 10N, assim como o aumento da frequência da ocorrência de precipitações episódicas intensas associadas às mudanças climáticas globais. Isso pode significar reduções nas vazões do rio São Francisco de 15-20% (MARENGO *et al.*, 2007).

Resultados obtidos por Lacerda *et al.*, (2009), revelaram tendência de diminuição da precipitação pluviométrica em várias bacias hidrográficas de Pernambuco, Haylock *et al.*, (2006), identificaram tendência de diminuição das chuvas anuais em localidades no Ceará, evidenciando que há de fato tendências que indicam que a diminuição, das chuvas em grande parte do Nordeste brasileiro, estão prevalecendo. Estudos posteriores para vários estados do Nordeste brasileiro mostram tendência de diminuição em 27 localidades do Ceará, levando em conta série histórica para período de 1974 a 2003, (MONCUNILL, 2006).

Santos e Brito (2007) mostraram que nos estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte a tendência foi de aumento no total anual da precipitação em 19 localidades estudadas. Para o Sertão de Pernambuco, Lacerda *et al.*, (2009) identificou uma diminuição da precipitação, em oito postos pluviométricos, no período de 1965 a 2004, instalados na área da

bacia do Pajeú, entre outras. Recentemente, uma análise espacial mais abrangente revelou diminuição média do total anual da precipitação em todas as mesorregiões de Pernambuco (Lacerda *et al.*, 2015). Santos e Manzi (2011) estudaram as tendências dos eventos extremos de precipitação sobre o estado do Ceará, associando-os às anomalias de TSM nos Oceanos Pacífico e Atlântico; os resultados mostram que há características de aumento nas intensidades das secas e diminuição dos eventos de precipitação intensa, por outro lado, o padrão das anomalias de TSM no Pacífico e no Atlântico, acarreta em aumento no número de dias consecutivos secos no norte do Ceará.

Estudo de tendências e detecção de mudanças climáticas em Pernambuco (LACERDA *et al.*, 2014) revelou um aumento de 4°C na temperatura máxima diária no período de 1961 a 2009 na estação meteorológica de Araripina e diminuição média de 275 mm (correspondendo a 57%) do total pluviométrico anual, em um conjunto de oito postos pluviométricos, na bacia do Pajeú. Em particular, a diminuição anual das chuvas esteve acompanhada do aumento dos períodos máximos de estiagem, que passaram de 20 para 35 dias, e do aumento da frequência de eventos de precipitação intensa (i.e. superior a 50 mm em 24 horas), que passaram de cinco para nove ocorrências por ano.

2.6 MODELOS DE PREVISÃO E SIMULAÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Os modelos globais de previsão climática são ferramentas para prever o clima passado, presente e futuro, podendo utilizar como forçantes o acúmulo de Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera (PBMC, 2013). O uso de modelos tem sido a forma mais eficiente para explicar as alterações do clima no planeta. A sua precisão depende da qualidade (quantidade e qualidade das séries históricas) dos dados de entrada e da eficiência da capacidade de predição. Os modelos de previsão climática global e regional têm avançado na última década para o estudo das mudanças do clima.

O INPE, especialmente, tem se destacado, pelo desenvolvimento na área de modelagem, com modelos atmosféricos regionais, globais e globais acoplados oceano-atmosfera. A variabilidade sazonal e interanual decorrente do fenômeno ENOS (El Niño/Oscilação Sul) estão bem representadas e simuladas nos Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGA) do CPTEC/INPE (PBMC, 2013). O modelo reproduz as anomalias de precipitação sobre a América do Sul devido ao ENOS, com excesso de precipitação no Sul do Brasil e déficit no Nordeste. Quando o fenômeno ENOS é forte, as anomalias previstas de precipitação sobre a Região Sul do Brasil correspondem mais fielmente às observações. O

deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre o oceano Atlântico é bem reproduzido, exceto por uma deficiência na sua migração sazonal (PBMC, 2013; MOURA;HASTENRATH, 2004).

Os modelos globais climáticos, acoplados oceano-atmosfera, são também usados para simular alterações do clima no futuro, como consequência de cenários de forçantes climáticas (gases de efeito estufa e aerossóis), como em Nobre *et al.*, (2013).

A formulação de políticas de adaptação em resposta a mudanças do clima tem mostrado que o nível de detalhamento fornecido por esses métodos ainda não está consolidado, ainda que, os MCGA forneçam simulações adequadas da circulação atmosférica em escala global (CAVALCANTI *et al.*, 2002; MARENGO *et al.*, 2003, VALVERDE; MARENGO, 2006). A principal razão é a resolução espacial destes métodos, que por vezes são da ordem de centenas de quilômetros, de forma que, forçantes de mesoescala (topografias complexas, cobertura vegetal, grandes lagos e rios) e uma gama de processos físicos (nuvens, processos de turbulência) com escala espacial inferior à resolução espacial da “grade” do modelo acarretam erros no decorrer da integração e assim, limitam a possibilidade de simular/prever com exatidão a variação, por exemplo, da temperatura ou precipitação, em escala regional (NICOLINI *et al.*, 2002; MISRA *et al.*, 2003; NOBRE; MALAGUTTI, 2004).

O Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre (BESM-Brazilian Earth System Model) é um dos mais recentes avanços. A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), está também representada numericamente na escala de tempo interanual e intrassazonal (PBMC, 2013). De forma geral, o Nordeste, a Amazônia, o sul do Brasil, o noroeste do Peru-Ecuador e o sul do Chile, o clima é bem reproduzido, se comparado com regiões como o Sudeste e Centro-Oeste do Brasil.

Marengo (2007) avaliou o desempenho dos modelos climáticos, do IPCC, em simular o clima do presente e futuro sobre o Brasil. De uma forma geral, os modelos conseguiram reproduzir a fase do ciclo anual climatológico da chuva (nos períodos seco e chuvoso). Para cenários futuros com alta concentração de CO₂ o modelo do Geophysical Fluid Dynamic Laboratory (GFDL) prevê um aumento da chuva sobre o Nordeste acima de 152% de seu valor climatológico, até o final dos próximos 100 anos. Já o modelo do Hadley Center (HAD) reduz a chuva em 64%, sobre o NEB.

Marengo *et al.*, (2007) mostraram que as projeções evidenciam a ocorrência dos extremos de temperatura e chuva na Amazônia, sendo as alterações mais acentuadas no modelo HadCM3 se comparado com outros modelos, mostra que há uma diferença

significativa das projeções associadas ao tipo de modelo utilizado. Estudos utilizando modelos globais para projeções de eventos extremos do clima futuro realizados por Tebaldiet *al.*, (2006), utilizando índices climáticos propostos por Frichet *al.*, (2002) usando saídas dos modelos globais acoplados oceano-atmosfera, mostraram que o Brasil, pode sofrer secas prolongadas, chuvas intensas e ondas de calor mais intensas durante as próximas décadas.

Os modelos climáticos globais e regionais são eficientes em reproduzir o padrão sazonal de precipitação e os vários sistemas meteorológicos, tais como ZCAS, ZCIT, para a América do Sul e Brasil (PBMC, 2013). A variação sazonal da precipitação, da pressão, ventos, temperaturas, entre outras variáveis tem sido representada. Entretanto, a precipitação sobre a região Amazônica e Centro-Sul da América do Sul tem sido subestimada e superestimada no Nordeste do Brasil e nas áreas de atuação da ZCIT e das ZCAS (PBMC, 2013). Por outro lado, o detalhamento obtido ainda não está consolidado ainda que, os modelos de circulação global forneçam simulações adequadas da circulação atmosférica em escala global (CAVALCANTI *et al.*, 2002; MARENGO *et al.*, 2003).

Uma das principais limitações do modelo atmosférico global é a resolução espacial, que é da ordem de centenas de quilômetros, deixando escapar detalhes importantes como, por exemplo, a topografia, a hidrologia, cobertura vegetal entre outros processos físicos com escala inferior à da grade do modelo, fato que acarreta erros nas simulações, impactando a qualidade das previsões em escala regional (ZORITA; VON STORCH, 1999; MENÉNDEZ *et al.*, 2001; NICOLINI *et al.*, 2002; MISRA *et al.*, 2003; NOBRE e MALAGUTTI, 2004).

Segundo Boyle (1993), tornar melhor a resolução dos modelos globais é melhorar as suas parametrizações. Assim sendo, técnicas de transferência da informação dos modelos globais, em larga escala, para escalas menores, são utilizadas e denominadas regionalização ou “downscaling” utilizando modelos regionais que permitem melhor detalhamento espacial e temporal das variáveis meteorológicas do sistema climático da terra. Essa é uma forma de aumentar a resolução espacial dos MCGA que é melhorar as previsões em escala regional.

Um dos problemas com essa técnica é alta demanda computacional. Aumentar a resolução do MCGA não é trivial, pois as parametrizações, tais como convecção, podem não estar bem descritas para a versão de alta resolução e os resultados podem ser mal representados em alguns lugares (BOYLE, 1993).

A técnica utilizada para melhorar a resolução espacial dos modelos climáticos globais para escalas menores é a regionalização (“downscaling”) das projeções desses modelos usando modelos climáticos regionais de maior resolução sobre a área de interesse e

tendo como condições de contorno, nas fronteiras laterais do domínio geográfico, dados provenientes do modelo climático global. A técnica de regionalização tem sido usada para previsões sazonais de clima no CPTEC (Modelo Eta/CPTEC/CPTEC 20 40 e 80 km de resolução espacial), FUNCEME (modelo RSM), SENAMHI e IGP-Peru (modelos RSM eMM5) e USP (RegCM3). Experiências com utilização da técnica de regionalização ou “downscaling” para previsão de tempo e clima foram detalhadas em Ambrizziet *al.*, (2007) e Moncunillet *al.*, (2002).

Os “downscaling” consistem basicamente em: (a) métodos dinâmicos, que utilizam modelos numéricos regionais, com maior resolução e as condições de contorno do modelo global (McGREGOR *et al.*, 1993;) e, (b) métodos estatísticos, que utilizam funções estatísticas de transferência entre as grades dos modelos (WILBY *et al.*, 1998; WILBY; WIGLEY, 1997). A utilização dessas técnicas tem permitido compreender melhor os processos dinâmicos e a física da atmosfera e dos oceanos, como suas interações com os vários componentes do sistema climático, como um todo. Avanços têm sido feitos para a melhoria da qualidade das previsões de tempo e clima (SELUCHI; CHOU, 2001; CHOU *et al.*, 2002; CHOU *et al.*, 2004; CHOU *et al.*, 2005; MISRA *et al.*, 2003; ALVES *et al.*, 2004;).

A utilização de modelos climáticos regionais, foi proposta por Dickinson *et al.*, (1989) e Giorgi (1990) e os ajustes e validação são realizados desde a década de 90, visando ao aprimoramento das previsões. Estudos têm sido realizados no sentido de reproduzir as características climáticas regionais para diferentes partes do planeta e testadas pelos climatologistas (LIU *et al.*, 1994; KATO *et al.*, 1999; SUN *et al.*, 1999; HUDSON; JONES 2002; JONES *et al.*, 2004). Marengo *et al.*, (2009), utilizou 03 modelos regionais (HadRM3P, Eta-CCS e RegCM3) com condições de contorno do modelo global HadAM3P, para obter simulações do clima atual e projeções para o futuro (até o fim século XXI) sobre a América do Sul. Os resultados mostraram que, na simulação do clima atual, os modelos produziram um viés negativo de precipitação em praticamente toda a América do Sul.

Os resultados para o modelo Eta-CCS apresentaram maior aquecimento no oeste da Amazônia quando comparados aos modelos RegCM3 e HadRM3P, enquanto que estes últimos apresentaram maior aquecimento na região leste da Amazônia. Machado; da Rocha (2011), avaliaram o desempenho de previsões sazonais do modelo climático regional RegCM3, aninhado ao modelo global CPTEC/COLA, em grande parte da América do Sul e os resultados obtidos e os índices estatísticos (*bias*, coeficiente de correlação, raiz quadrada

do erro médio quadrático e coeficiente de eficiência) mostraram que a chuva sazonal prevista pelo RegCM3 é mais próxima das observações do que a prevista pelo CPTEC/COLA.

Embora o principal uso do modelo Eta seja para aplicações regionais de previsão do tempo (CHOU *et al.*, 2005), o modelo também tem sido muito bem sucedido em clima regional e aplicações de previsão sazonais (MESINGER, 1988). Pesquero *et al.*, (2009) relataram padrões de circulação atmosférica sobre a América do Sul durante o verão e inverno para determinar a precipitação e temperatura de superfície. O modelo Eta é um modelo atmosférico “state-of-the-art” usado para fins operacionais e de investigação. O modelo é um descendente do modelo anterior do Instituto Hidrometeorológico e Universidade de Belgrado (HIBU), que foi desenvolvido nos anos setenta na ex-Jugoslávia (JANJIC, 1984). Na década de oitenta, o código foi atualizado para o esquema de advecção horizontal Arakawa-estilo de Janjic (1994) e, em seguida, foi reescrito para usar o Eta coordenada vertical.

Posteriormente, no NCEP, o modelo foi aprimorado com um pacote avançado de física (MENÉNDEZ, 2001). Uma descrição dos mesmos modelos regionais e seus diversos aspectos simulados de climatologia está em Chou *et al.*, (2001); Marengo *et al.*, (2011) e Solman *et al.*, (2013). O código, inclui uma versão atualizada que está disponível para download no site do NCEP na <http://etamodel.cptec.inpe.br/download.shtml>. Pisnichenko; Tarasova (2009), desenvolveram uma nova versão do modelo para estação de trabalho (Eta-WS) e para cenarização de mudanças climáticas a longo prazo (Eta-CCS). Numerosas modificações e correções foram feitas para o código original do modelo de previsão Eta-WS.

Segundo Marengo *et al.*, (2010, 2011), só os avanços no conhecimento do sistema climático, como um todo, podem reduzir as incertezas associadas às projeções dos modelos. Há indícios de que regiões como o Nordeste do Brasil e o centro-leste da Amazônia possam vir a ter deficiência de chuvas no futuro, enquanto o Noroeste da costa do Peru e Equador tenham chuvas em excesso.

Os cenários climáticos produzidos pelos modelos podem ter problemas em representar realisticamente os processos físicos que acontecem na natureza. As projeções de extremos climáticos, geradas pelos modelos do IPCC, apontam para um aquecimento maior durante o inverno e estações de transição, assim como tendências de noites mais quentes, que são consistentes com as tendências positivas das temperaturas mínimas maiores do que as máximas. Existem, também, indicadores de períodos secos mais longos e intensos para o setor leste da Amazônia e para o setor leste do Nordeste do Brasil e de aumento da frequência e

intensidade dos eventos extremos de chuvas para a América do Sul tropical (MARENGO; VALVERDE, 2007).

Em relação às incertezas, existem aquelas relacionadas aos cenários de emissões, parametrizações e à modelagem do clima, propriamente dita (PBMC, 2013). Técnicas diferentes de regionalização e/ou parametrização podem produzir respostas localmente diversas, mesmo que as simulações sejam forçadas pelo mesmo modelo global.

Chouet *al.*, (2011), utilizaram o modelo regional Eta forçado pelo modelo global HadCM3 do Hadley Centre para simular as condições climáticas sobre a América do Sul. O modelo Eta foi modificado para executar integrações decadais de longo prazo e se mostrou eficiente em reproduzir o clima atual (período de 1961-1990). O modelo foi configurado com grade de 40 km e 38 camadas em relação a vertical. As simulações resultantes deste experimento produzidas pelo Eta-CPTEC/HadCM3 mostraram-se compatíveis com os dados de precipitação e temperatura da reanálise (CHOU *et al.*, 2011). Os fenômenos El Niño e La Niña foram representados nas simulações desse experimento. A precipitação e as anomalias de temperatura foram compatíveis e reproduzidos pelos modelos Eta-CPTEC/HadCM3.

Segundo PBMC (2013), as incertezas nas projeções das mudanças do clima são inerentes ao sistema climático da terra, inicialmente devido às interações não lineares e às complexidades próprias dos fenômenos naturais. Para diminuir essas incertezas fazem-se necessários múltiplos tratamentos em modelagem e observações aplicadas em conjunto. Embora na última década tenha havido melhorias nas projeções climáticas e ambientais, há níveis de incertezas cujas categorias são relativas aos cenários de emissões, à variabilidade natural do sistema climático e aos modelos climáticos, propriamente ditos.

As incertezas nas projeções regionais dos modelos numéricos do clima foram detalhadamente discutidas no relatório do IPCC (2001). O primeiro ponto a ser esclarecido é que toda técnica de regionalização ou “downscaling” contém erros derivados do modelo global ao forçar o modelo regional. Por outro lado, ainda que sejam usados os mesmos cenários de emissões, diferentes modelos produzem diferentes projeções das mudanças climáticas. Isso pode ser minimizado pela aplicação de um conjunto de simulações (ensembles) de modelos globais e regionais. Se as diferenças forem adicionadas às mudanças climáticas do presente para a geração de cenários de climas do futuro, as incertezas serão significativas em cada um dos processos de integração. A título de ilustração foi colocada a Tabela 2, que mostra as fontes de incerteza do modelo HAdRM3.

Tabela2- Abordagem sobre alguns aspectos dos problemas relacionados às incertezas na construção de cenários climáticos.

Fonte de incerteza	Representando no MCR	Como tratar a incerteza
Emissões Futuras	Sim	Utilizar modelos para uma variedade de cenários de emissão
Taxa de emissão à concentração	Não	Uso de modelos de ciclo de carbono e modelos de química atmosférica
Pouco entendimento/ representação imperfeita de processos em modelos de clima (incerteza científica)	Em desenvolvimento	Uso de projeções de vários modelos globais de clima
Variabilidade natural do clima	Sim	Uso de conjunto ou “ensemble” de previsões de GCM com várias condições iniciais
Acrescentar detalhe espacial e temporal	Não	Usar outros modelos regionais de clima ou “downscaling” estatístico juntamente com o HAdRM3

Fonte MMA, 2007

Em relação a eventos climáticos extremos, o impacto mais importante é o aumento da taxa de dias secos consecutivos (CDD), que é um indicador de períodos de seca; CDD pode chegar a mais de 30 dias/ano, até o final do século XXI, no cenário A2, em comparação com 12 dias/ano, no clima atual. Dentre os vários resultados, também foi prevista uma redução dos dias com intensa precipitação, particularmente, no Nordeste. Os cenários climáticos para o cenário de emissões A2 sugerem uma tendência de aumento do stress hídrico (aumento da frequência de dias secos consecutivos) sobre o Nordeste, com uma tendência crescente de aridificação na região semiárida até final do século XXI (PBMCM,2013).

3- MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa foram utilizadas séries históricas, com dados diários de mais de 45 anos de precipitação nas décadas de 1950-60 a 2010 e de temperatura diária do ar para as seguintes localidades: Araripina, Petrolina, Caruaru, Vitória de Santo Antão, Recife e Arquipélago de Fernando de Noronha, em Pernambuco (Figura 14).

Figura 14 - Localização geográfica das cinco estações meteorológicas do IPA.



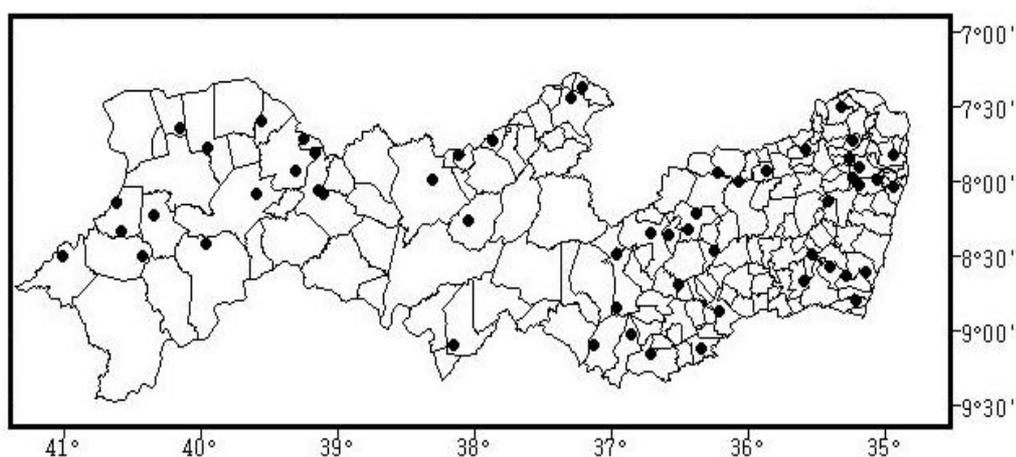
Fonte: autora

Também foram utilizadas séries temporais históricas de 33 postos pluviométricos com dados do período de 1960 a 2004 e um conjunto de 23 postos com períodos de dados entre 1911-1937 a 1992-2011 (Figura 16). Os dados utilizados foram provenientes do banco de dados do antigo Laboratório de Meteorologia de Pernambuco (Lamepe), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Fernando de Noronha (DESTAE), da Aeronáutica e do Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica de Cabo Verde (INMG).

Os dados pluviométricos e termométricos foram submetidos a um controle de qualidade, aonde se considerou a consistência espacial e temporal das observações diárias de precipitação e a temperatura das estações pré-selecionadas. Os metadados de cada posto meteorológico foram utilizados no processo de controle de qualidade das séries temporais deste estudo. A consistência dos dados foi feita pela aplicação de testes de homogeneidade das séries pluviométricas e termométricas diárias dos postos com séries temporais superiores a 40 anos. De modo a ampliar a cobertura espacial dos diagnósticos de mudanças no regime das precipitações sobre o território do estado de Pernambuco, como um todo, também

foi utilizado um conjunto de 23 postos pluviométricos dispostos por mesorregião. Primeiro os metadados de cada estação (por exemplo, a localização do termômetro, mudanças de sensores e valores discrepantes, devido a erros de digitação etc.) foram utilizadas para determinar as lacunas e valores extremos de dados, verificados contra as folhas de dados originais e corrigidos manualmente no banco de dados digital. Em seguida, os testes sistemáticos de qualidade dos dados fornecidos pelo RCLimdex (ZHANG; YANG, 2004) foram aplicados. O pacote gera 27 índices para detectar as alterações climáticas, seis dos quais estão relacionados com a temperatura, por exemplo, a tendência linear de uma série de tempo pelo método dos mínimos quadrados, o nível de significância estatística da tendência (valor de p), o coeficiente de determinação (r^2) e o erro padrão de estimativa.

Figura 15 - Distribuição Espacial dos 56 postos pluviométricos com mais de 45 anos de dados



Fonte: LAMEPE, 2008

Deste modo, as tendências consideradas como indicativos de possíveis mudanças climáticas de longo prazo, foram aquelas para as quais o índice mostrou uma tendência linear (positiva ou negativa) maior do que o erro padrão de estimativa e estatisticamente significativa (isto é, valor de $p < 0,1$). Ao avaliar a homogeneidade dos dados e o cálculo do índice, a metodologia utilizada foi a de Zhang *et al.*, (2005) e Haylock *et al.*, (2006) (disponível em <http://ccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.html>). Os índices de extremos climáticos para a monitorização e detecção de mudanças climáticas "índices RCLimdex" têm sido utilizados por diversos autores (SANTOS; BRITO, 2007; HAYLOCK *et al.*, 2006; LACERDA *et al.*, 2009; MONCUNILL, 2006 e FRICH *et al.*, 2002) e no quarto relatório do IPCC (IPCC, 2007). Todos os índices para a temperatura e precipitação listados na Tabela 2 foram calculados com o pacote RCLimdex, conforme documentado no site da

ComprehensiveR Archive Network (<http://cran.r-project.org/web/packages/climdex.pcic/index.html>). A validação de índices climáticos extremos, usando RCLimdex, e as mudanças projetadas simuladas pelos modelos CMIP5, também foi utilizada em Sillmann *et al.*, (2013a) e Sillmann *et al.*, (2013b).

As séries temporais de 33 postos pluviométricos foram agregadas segundo as bacias hidrográficas (Pajeú, Brígida, Capibaribe e Una) e as mesorregiões do Estado (Sertão, Agreste e Litoral) pela normalização das séries históricas mensais com desvio padrão de cada série, segundo a expressão:

$$Z_{ij} = (P_{ij} - P_j) / S_j \quad (\text{Equação 1}),$$

onde: os índices “i” se referem ao ano da observação, “j”, se refere ao valor climatológico para cada mês do ano, “P” à precipitação e “S” ao desvio padrão. A variável Z, assim computada, tem média zero e desvio padrão unitário. Este método de normalização já foi usado por Back (2001), entre outros.

O RCLIMDEX também executa as seguintes estatísticas: tendência linear calculada pelo método dos mínimos quadrados; nível de significância estatística da tendência (valor p); coeficiente de determinação (r^2) e erro padrão da estimativa. Assim sendo, o programa considera como tendências climáticas os índices que apresentam tendência linear (negativa ou positiva) superior ao erro padrão da estimativa e estatisticamente significativos (valor de $p < 0,1$), obtidos pelo teste *t* de *student* a saber: 99% para $p < 0,01$, 95% para $p < 0,05$; 90% para p contido no intervalo 0,05 a 0,1 e sem significância $p > 0,1$.

O segundo passo foi o de realizar o cálculo dos balanços hídricos anuais (MCCABE; MARKSTROM, 2007) para as cinco estações meteorológicas (Araripina, Petrolina, Caruaru, Vitória e Recife, cujas localizações são mostradas na Figura 15), considerando os dados diários de precipitação e temperatura do ar em 40 anos de observações meteorológicas. Os balanços hídricos foram calculados adotando-se o método de Thornthwaite e Mather (1955) pelo aplicativo desenvolvido por McCabe *et al.*, (2007), para uma capacidade de água disponível (CAD) de 100mm, com a evapotranspiração potencial (ETP) sendo estimada pelo método de Thornthwaite (1948). Os dados de temperatura média mensal do ar e precipitação pluviométrica total, média mensal, são pertencentes às redes do IPA, EMBRAPA e INMET. As variáveis de saídas mensais analisadas, do balanço hídrico, foram evapotranspiração potencial (PET) e o armazenamento de água no solo (ARM).

O terceiro passo metodológico consistiu em simulações numéricas para o clima atual e futuro, fazendo uso do modelo Regional Eta atmosférico (MESINGER *et al.*, 1988; MARENGO *et al.*, 2010 e CHOU *et al.*, 2011) aninhado em dois modelos climáticos globais, HadCM3 e BESM.

O modelo regional Eta/CPTEC é proveniente do National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (MESINGER *et al.*, 1988; BLACK, 1994). É um modelo em ponto de grade; na horizontal é utilizada a grade E de Arakawa e a coordenada vertical é a coordenada h (Mesinger, 1984), onde p é a pressão atmosférica (Equação 2). Os índices s e t se referem à superfície e ao topo da atmosfera, respectivamente. O índice r se refere ao valor da pressão de uma atmosfera de referência; Z_s é a altitude da superfície.

$$\eta = \left[\frac{(p - p_t)}{(p_s - p_t)} \right] * \left[\frac{(p_{ref}(Z_s) - p_t)}{(p_{ref}(0) - p_t)} \right] \quad (\text{Equação 2})$$

A topografia é resolvida na forma de degraus discretos. A coordenada se baseia em pressão, o que a torna aproximadamente horizontal. O topo do modelo está em 25 hPa. As variáveis prognósticas são: temperatura, umidade, vento horizontal, pressão à superfície, energia cinética turbulenta, umidade e temperatura do solo e hidrometeoros das nuvens. O modelo possui esquema de microfísica de nuvens. O domínio do modelo abrange a maior parte da América do Sul. A temperatura da superfície do mar é atualizada a cada dia da integração.

Para utilizar os dados das simulações do modelo climático global HadCM3 com o objetivo de fazer a regionalização ("downscaling") para o domínio específico com o modelo Eta/CPTEC, foi necessário a preparação da "interface" que adapta os dados do Hadley Center de maneira adequada para a utilização destes como dados de entrada no modelo Eta/CPTEC. O modelo Eta/CPTEC utiliza dados de entrada em formato GRIB em níveis isobáricos (padrão de reanálise e padrão do modelo americano AVN). Estes dados são vento zonal e meridional, altura da superfície isobárica, pressão à superfície e umidade específica.

Os cenários regionais foram gerados para a região Nordeste, com uma resolução espacial de 40 km ao longo de todo o oceano Atlântico tropical e a porção tropical da América do Sul. Os experimentos com o modelo Eta foram utilizados para duas concentrações de CO₂ atmosférico: 380 ppmv (1960 a 2000) e 760 ppmv (2010-2050). As simulações para o clima atual (1960-2000) e cenários futuros (2010-2050) foram feitas usando condições de

contornado modelo climático global HadCM3, como utilizadas em estudos anteriores (CHAPLOT, 2007; CHOU *et al.*, 2005; AMBRIZZI *et al.*, 2007).

Neste estudo, as simulações com o modelo brasileiro (BESM), um modelo global-oceano-atmosfera-biosfera-criosfera acoplado, descrito em detalhes em Nobre *et al.*, (2013), foram utilizadas para caracterizar o clima presente. Os resultados das simulações com o modelo Eta aninhado ao BESM foram utilizadas para a presente caracterização climática. Também, foram utilizados cenários climáticos futuros com BESM e os resultados das simulações com o experimento BESM 4X de concentração de CO₂ atmosférico (ou seja, 1.200 ppm de CO₂). Foi comparado um cenário para o ano de 2100, sob a concentração CMIP5 radiativa Pathway 8,5 (RCP 8,5) (TAYLOR *et al.*, 2009), com o experimento de controle, onde a concentração de CO₂ é fixa em 374 ppm (representando o clima atual).

4 - RESULTADO E DISCUSSÃO

A Tabela 3 mostra os resultados das análises de tendência aplicadas às séries históricas de precipitação e temperatura para os sítios disponíveis. Foi utilizada uma regressão linear simples para estimar a tendência linear (ou seja, a inclinação linear) presente nas séries históricas. A significância estatística foi testada com o teste t de Student. A hipótese nula foi a de que nenhuma tendência ocorreu (ou seja, o clima é imutável). As análises de tendência foram baseadas em tendências com uma significância estatística maior do que ou igual a 95% (ou seja, $p < 0,05$) e 99% ($p < 0,01$), mostrados na Tabela 3 como azul, preto e negrito, respectivamente. Na tabela 2 estão os valores correspondentes ao máximo (Txx) e mínimo (Txn) das temperaturas máximas e o valor máximo (Tnx) e mínimo (Tnn) das temperaturas mínimas.

Verificou-se que, para todas as localidades, as tendências foram positivas nas séries históricas que correspondem às temperaturas máximas, destacando-se as localidades de Araripina e Vitória de Santo Antão onde as tendências apresentaram os maiores valores que foram: de 0,72°C por década e 0,45°C por década, respectivamente, seguidos por Recife e por Petrolina, ambas com valores 0,19°C por década.

Para o caso das mínimas das temperaturas máximas, todas foram positivas, com destaque para Araripina, com tendência extrema de 1,82°C por década. No caso das temperaturas mínimas, duas das cinco estações apresentaram tendências negativas (Caruaru e Vitória de Santo Antão), tendo as restantes apresentado tendências positivas. Por outro lado, ressalta-se que para Araripina e para Vitória de Santo Antão as tendências da mínima das temperaturas mínimas apresentaram baixa significância estatística.

Tabela 3 - Tendências e valores médios para o máximo e o mínimo dos maiores valores médios anuais da temperatura, máxima e mínima da menor temperatura (°C/década), tendência precipitação (mm/década) para vários locais. As cores existentes (negrito, azul e preto) indicam significância estatística dos índices de tendência: negrito (99%), azul (95%) e preto (90%). Os valores sem significância estatística estão em vermelho.

Sítios	Período	Tendências - temperaturas (°C/decade)				Tendências Precipitação (mm/década)
		Txx	Txn	Tnx	Tnn	PRCPTOT
Araripina	1962 -2011	0.72 (*)	1.82	-0.40	0.05	-25.4
Caruaru	1960 -2011	0.28	0.10	-0.37	-0.30	-03.5
Petrolina	1965 -2007	0.19	0.39	0.13	0.12	-42.0
Vitoria	1957 -2011	0.45	0.50	0.43	-0.01	07.5
Recife	1962 -2009	0.19	0.20	0.18	0.27	-44.2

Os resultados das análises de tendência da pluviosidade evidenciaram valores negativos, exceto para Vitória de Santo Antão que apresentou tendência levemente positiva.

Ressalte-se, entretanto, que no caso das cidades de Caruaru e de Vitória de Santo Antão as tendências da pluviosidade apresentaram baixa significância estatística. Em destaque as cidades de Petrolina e de Recife, que apresentaram a maior taxa de redução 4,2 mm/ano e 4,4 mm/ano.

As tendências de aumento das temperaturas máximas diárias foram observadas em todas as estações meteorológicas. É interessante observar, no caso de Araripina, em maior proporção e no de Vitória de Santo Antão, em menor proporção, o aumento das mínimas temperaturas máximas (i.e. $1,8^{\circ}\text{C}/\text{década}$) e a diminuição das máximas temperaturas mínimas (i.e. $-0,4^{\circ}\text{C}/\text{década}$). Este fato, por outro lado, em conjunto com a tendência na diminuição da pluviometria anual daquela localidade, que foi de $-25,4 \text{ mm}/\text{década}$, constitui forte indicador de acelerado processo de aridificação em Araripina.

O aumento das temperaturas máximas e a diminuição das temperaturas mínimas, acompanhadas pela diminuição da pluviometria anual de $-3,5 \text{ mm}/\text{década}$, constatado em Caruaru, representa um indicador de que processos de aridificação também estão instalados naquela localidade. No restante das estações, as temperaturas Tmax e Tmim estão aumentando. Não obstante, os mais severos valores de redução da pluviosidade estão ocorrendo em Petrolina e em Recife com taxas de redução de 4,2 mm/ano e 4,4 mm/ano, respectivamente.

No cômputo geral (Tabela 3), constata-se que no conjunto de estações se observa um aumento das temperaturas máximas e a diminuição da pluviometria, enquanto as tendências de temperatura mínima mostraram valores tanto positivos quanto negativos. Isto é uma indicação de que no Estado de Pernambuco, como um todo, está aquecendo e conta com situações diversas de aridificação.

A Figura 16 mostra as tendências lineares para as temperaturas máximas e mínimas anuais para as cinco estações -Araripina, Vitória de Santo Antão, Recife, Petrolina e Caruaru. Embora o aumento das temperaturas máximas esteja presente em todas as estações, as maiores taxas foram detectadas em Araripina, Vitória e em Petrolina $1,28$, $0,83$, e $0,42^{\circ}\text{C}/\text{década}$, respectivamente. Dois desses locais mostraram tendências negativas de temperatura mínima: Araripina e Caruaru em $-0,09^{\circ}\text{C}/\text{década}$ e $-0,08^{\circ}\text{C}/\text{década}$, respectivamente. Em todos os outros locais, as temperaturas mínimas estão aumentando (Figura 16).

Como resultado, a combinação do aumento das temperaturas máximas anuais e diminuição das temperaturas mínimas, ao longo dos anos, sugere um processo de aridificação

estabelecendo, tanto em Araripina como em Caruaru. No caso de Araripina, os dias quentes estão cada vez mais quentes e os dias frios se tornando cada vez mais frios e, além disso, a precipitação está diminuindo (Tabela 3). Numa proporção menor, em Caruaru, há também condição de aridificação acompanhada pela redução de chuva (Tabela 3). Já em Petrolina, que igualmente mostra aumento da temperatura máxima e redução da chuva, não há tendência de diminuição das temperaturas mínimas, ao longo da série estudada.

Para entender melhor as variações das temperaturas máximas e mínimas, em longo prazo, foram realizadas as análises de tendência para cada mês especificamente, como mostrado na Figura 17. A maior tendência de temperatura máxima foi detectada em Araripina, um aumento de $1,6^{\circ}\text{C}/\text{década}$, no mês de junho. O maior valor de diminuição da temperatura mínima foi de $-0,45^{\circ}\text{C}/\text{década}$, em dezembro. Em Caruaru, enquanto a tendência da temperatura mínima diminui ao longo do ano, a tendência de temperatura máxima é positiva durante o primeiro semestre e negativa durante parte do segundo semestre do ano. As análises de tendências para as temperaturas mínimas em Caruaru e tendências de aumento da temperatura máxima em Araripina são semelhantes (Figura 17 (a), (e)). Em Vitória e Petrolina, houve um aumento tanto nas temperaturas máximas quanto nas mínimas em todos os meses do ano, com maior aumento da tendência na temperatura máxima para Vitória de Santo Antão e menor para Petrolina.

Em Vitória há tendência significativa de aquecimento nos meses de março, junho e setembro. Os valores chegam até $1^{\circ}\text{C}/\text{década}$. Por outro lado, as mínimas temperaturas têm aumentado de forma mais homogênea e contínua e os valores de aumento oscilam entre $0,1$ a $0,2^{\circ}\text{C}/\text{década}$, praticamente, durante todos os meses do ano. Em Petrolina, as maiores tendências de aumento, da temperatura máxima, aparecem nos meses de dezembro e abril, valor de aproximadamente $0,6^{\circ}\text{C}/\text{década}$. Em Caruaru, os dias dos meses de março, abril e maio estão ficando mais quentes e o aumento é de aproximadamente $0,3^{\circ}\text{C}/\text{década}$.

Uma situação diferente é vista na localidade de Recife, que mostrou uma tendência positiva maior para as temperaturas mínimas do que para as temperaturas máximas, em todos os meses da estação mais seca do ano (agosto a fevereiro). Os valores de aumento variaram entre $0,1$ a $0,3^{\circ}\text{C}/\text{década}$. Já durante a estação chuvosa (março a julho), a tendência da temperatura máxima excedeu a tendência de temperatura mínima. A predominância do aumento das temperaturas mínimas foi superior às temperaturas máximas, como evidenciadas nas variações das taxas de aumento das temperaturas mínimas (indicadas pelas áreas coloridas em verde na Figura 17).

Figura 16 - Tendências das temperaturas (°C) máximas e mínimas para Araripina, Vitória de Santo Antão, Recife, Petrolina e Caruaru períodos de 1950-60 a 2005

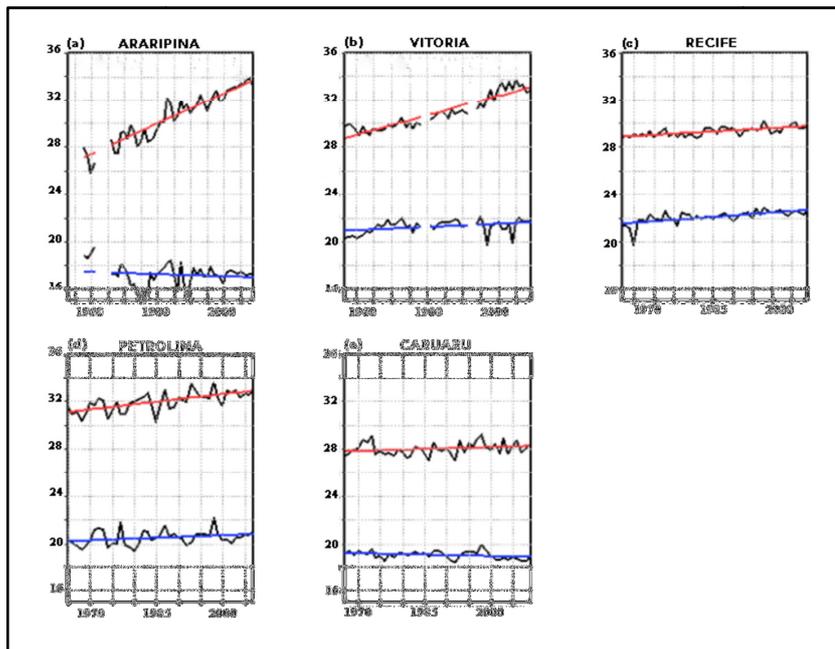
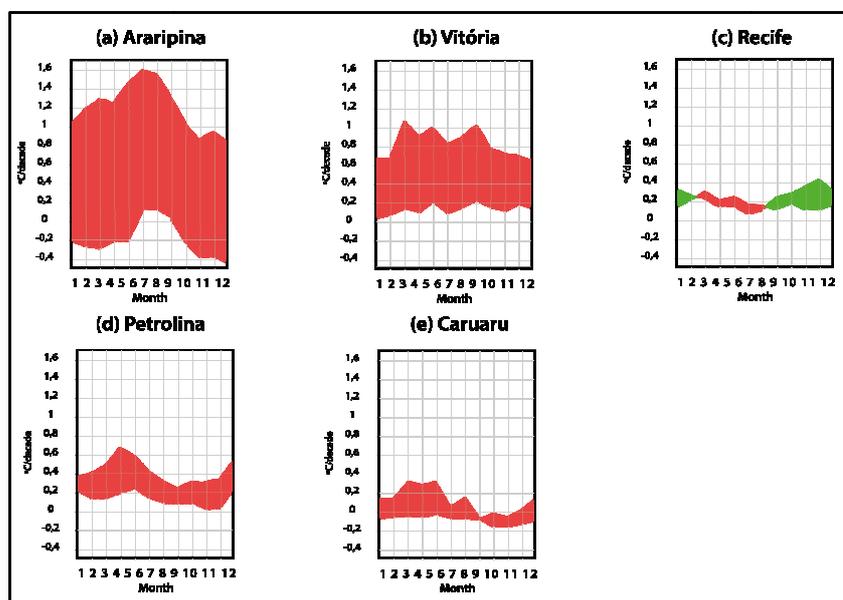


Figura 17 - Tendência decenal das temperaturas máximas (linha contínua) e mínimas (linha tracejada) (°C/década) para cada mês do ano nas estações meteorológicas de Araripina, Vitória, Recife, Petrolina e Caruaru.



(*) Hachura vermelha (verde) indica que a taxa de variação decenal da temperatura máxima (mínima) é superior à da temperatura mínima (máxima) para os períodos de 1950-60 a 2010.

4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA A PRECIPITAÇÃO

Enquanto a temperatura tende a ser um campo espacialmente mais bemcomportado, a precipitação não apresenta essa característica, particularmente nas regiões tropicais onde ela é descontínua no tempo e no espaço e, considerando que a precipitação possui um maior número de séries temporais (em relação à temperatura) e de postos de coleta de dados, alguns deles com até 100 anos de dados diários (sete localidades), a amostragem espacial para análise dos dados de precipitação aumentou para 23 e 33 estações, organizada em períodos distintos conforme descrição abaixo.

Os dados foram dispostos em número de 23 estações pluviométricas agregadas de acordo com a Equação 1 sobre as áreas de Sertão, Agreste e Mata e por microrregiões como representadas nas Figuras 18 e 19. Essa disposição das análises dos dados teve como objetivo principal ampliar a cobertura espacial dos diagnósticos de mudanças no regime de chuva sobre o estado de Pernambuco.

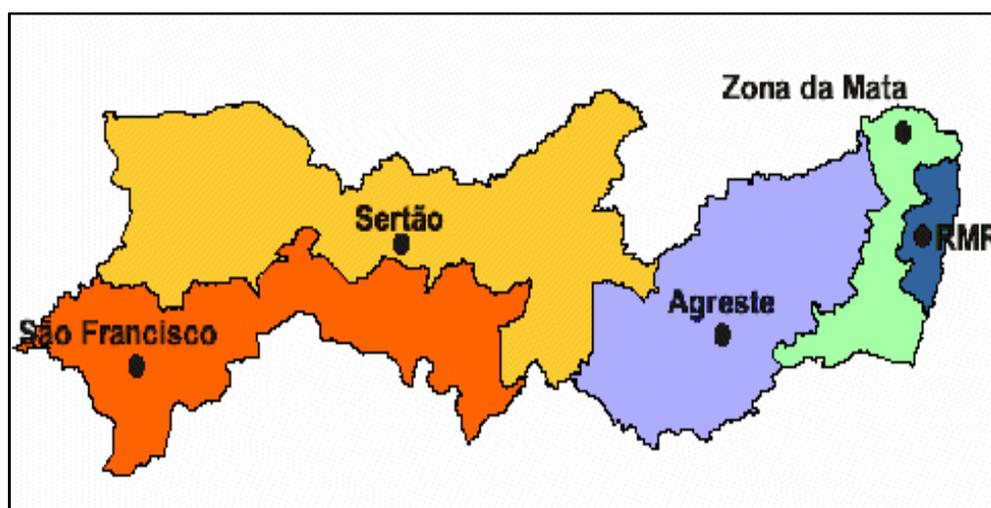
Do conjunto de 23 postos pluviométricos (Tabela 4), dentre as 14 estações localizadas no Sertão, 09 mostraram aumento da precipitação na ordem de 2,4 mm/ano e as restantes apresentaram redução, com valor médio de -3,2 mm/ano. No Agreste, apenas Gravatá e Águas Belas mostraram tendência de aumento da precipitação (3,50 mm/ano e 4,04 mm/ano, respectivamente) e o restante apresentou tendências negativas. A Zona da Mata foi a única mesorregião que apresentou predominância de tendências positivas, em destaque a localidade de Vitória de Santo Antão que apresentou a maior taxa de aumento (5,68 mm/ano) dentre todos os municípios pré-selecionados.

Um novo conjunto de dados pluviométricos com 33 estações, considerando o período de 1964 a 2004, foi agregado em três microrregiões do Sertão: Araripe, Petrolina e Pajeú, também, por mesorregião (Sertão, Agreste e Mata) e por bacia hidrográfica (Brígida, Capibaribe, Pajeú e Una) (Tabela 5). Os resultados para os valores agregados por mesorregião mostraram redução da precipitação, sendo que o Sertão apresentou a maior redução, com 10,34 mm/ano, seguida pelo Agreste e Zona da Mata, com valores de -8,49 e -6,70 mm por ano, respectivamente. Os resultados das análises nas microrregiões dos sertões do Pajeú, Araripe e Petrolina, no período de 1964-2004, também mostraram diminuição da precipitação. Considerando somente as mais longas séries históricas (100 anos), por mesorregião, as análises de tendências de precipitação revelaram tendências positivas e negativas com valores de 11,0 mm/década, -2,1 mm/década e 4,6 mm/década, sobre o Sertão, Agreste e Mata, respectivamente.

As informações da Tabela 5 mostram que em todas as bacias hidrográficas analisadas houve reduções dos totais pluviométricos. Os maiores valores de redução foram detectados nas bacias do Brígida e do Pajeú, no semiárido do estado, com reduções de -11,06 mm/ano e -8,42 mm/ano, respectivamente. As Bacias do Capibaribe e Una também apresentaram redução da precipitação, porém as taxas foram inferiores com os valores de -73mm/ano e -5,36 mm/ano, respectivamente.

As análises de tendências de dias secos nas bacias do Brígida e do Pajeú mostraram que há um aumento dos dias secos de 0,96 e 0,97 dias por ano, respectivamente, valor correspondente ao aumento de aproximadamente 10 dias secos por década. Os dados para as bacias do Una e do Capibaribe não apresentaram significância estatística.

Figura 18 - Mapa com a identificação das Mesorregiões geográficas em Pernambuco (Sertão, Sertão do São Francisco, Agreste, Zona da Mata e Região Metropolitana do Recife).

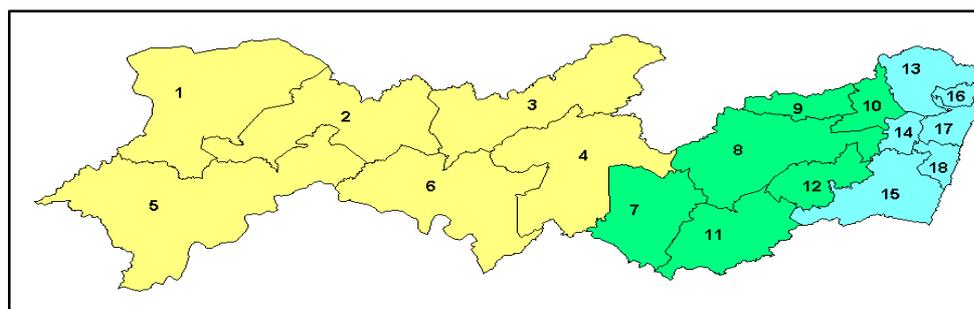


Fonte: Lamepe, 2006

Tabela 4 - Relação das 23 localidades selecionadas, com os valores das tendências calculadas para as séries históricas de precipitação (mm/ano) e valor médio anual da precipitação (mm) para os períodos: 1911-1937 a 1992-2011

Mesorregião	Precipitação	
	Tendência (mm/ano)	Valor médio (mm)
Sertão		
Afogados da Ingazeira	1,64	608
Afrânio	5,43	447
Betânia	0,51	512
Custódia	-4,72	757
Exu	-4,64	783
Flores	-4,34	742
Parnamirim	-1,27	539
Petrolina	1,11	417
Santa Cruz da Venerada	-1,09	510
Serrita	1,00	572
Sertania	1,85	546
São José do Belmonte	4,86	638
São José do Egito	3,90	511
Tacaratu	1,30	773
Agreste		
Águas Belas	3,59	679
Bom Jardim	-5,25	1.115
Brejo da Madre de Deus	-3,02	815
Buíque	-5,97	1.075
Gravatá	4,04	511
Surubim	-1,24	606
Zona da Mata		
Carpina	4,16	1.029
Timbaúba	1,53	1.008
Vitória	5,68	1.003

Figura 19 - Mapa com a identificação das Microrregiões Homogêneas de Pernambuco (1. Araripina, 2. Salgueiro, 3. Pajeú, 4. Moxotó, 5. Petrolina, 6. Itaparica, 7. Vale do Ipanema, 8. Vale do Ipojuca, 9. Alto Capibaribe, 10. Médio Capibaribe, 11. Garanhuns, 12. Brejo, 13. Mata Meridional, 14. Mata Setentrional, 15. Vitória de Santo Antão, 16. Itamaracá, 17. Recife e 18 Suape).



Fonte: Lamepe, 2006

Tabela 5 - Análise de tendências para os 33 postos pluviométricos (mm/ano) agregados por bacia hidrográfica e por mesorregião do estado de Pernambuco no período de 1964 a 2004

Bacias	Precipitação	
	Tendência (mm/ano)	Valor médio (mm)
Brígida	-11,06	648
Pajeú	-8,42	618
Capibaribe	-7,73	779
Una	-5,36	1213
Mesorregiões	Tendência (mm/ano)	Valor médio (mm)
Sertão	-10,34	558
Agreste	-8,49	625
Mata/Litoral	-6,79	1478

Em síntese, as análises de tendência da precipitação, considerando o maior número possível de postos com as maiores séries histórica, detectaram diminuição das precipitações pluviométricas, no Sertão e no Agreste. Para o Agreste, as tendências são predominantemente negativas, enquanto que no Sertão a maioria dos postos apresentou tendências positivas (não obstante no agregado para o Sertão a tendência tenha sido de diminuição da pluviometria). No caso da Zona da Mata, os dados dos postos utilizados refletiram aumento da tendência de chuva. As análises de tendências das precipitações pluviométricas, por bacia hidrográfica e por mesorregião homogênea, evidenciaram a diminuição da precipitação, como um todo.

4.2 ANÁLISE DOS BALANÇOS HÍDRICOS

Foram gerados balanços hídricos para quatro estações de Pernambuco (Araripina, Petrolina, Caruaru e Vitória do Santo Antão) visando a uma análise da disponibilidade hídrica nessas estações. Para tanto, foram utilizadas as séries históricas diárias de precipitação e temperatura com 40 anos de dados observacionais para gerar as variáveis de saídas do balanço hídrico (BH); Evapotranspiração Potencial (ETP) e Armazenamento (ARM).

A Figura 20 mostra a tendência decenal da ETP para cada mês do ano nas cinco estações meteorológicas. A maior tendência decenal ETP ocorreu em Araripina (Figura 20 a) com valores em torno de 15 mm / década durante a estação seca (maio a agosto) seguida de Vitória (Figura 22 b) a 12 mm / década durante agosto, que é o último mês da estação chuvosa. As outras estações registaram uma tendência decenal menor de ETP, com valores positivos ao longo do ano sobre Petrolina e Recife (Figuras 20 d e 20 c). Somente em Caruaru

(Figura 20 e) as tendências de ETP variaram; foram positivas durante o primeiro semestre do ano e negativas nos períodos subsequentes.

Tal comportamento das tendências negativas ou positivas de ETP é consistente com as tendências das temperaturas máximas e mínimas (Figuras 16 e 17) em Caruaru (Figura 20 (e)). No restante das estações analisadas, as tendências decenais de ETP foram positivas e consistentes com as tendências de temperatura máxima em todas as estações (Figuras 16, 17). Em Recife, a tendência de aumento das taxas de ETP foi linear ao longo dos meses, igualando-se a aproximadamente 1 mm/década, consistente com os pequenos aumentos de tendências de temperatura mostrados na Figura 20c.

Figura 20 - Tendência decenal da evapotranspiração potencial (ETP) mensal (mm/década) em 40 anos de observação em (a) Araripina, (b) Vitória de Santo Antão, (c) Recife, (d) Petrolina, e (e) Caruaru.



A Figura 21 mostra as tendências decenais de ARM para cada mês do ano. Em Araripina (Figura 21a), houve uma maior tendência de redução do armazenamento de água ao longo dos meses do ano, com as maiores taxas de redução em fevereiro e maio - em -12 mm / década e -9 mm / década, respectivamente. Esses valores são consistentes com a maior

tendência detectada de diminuição na precipitação total (Tabela 1). No caso de Petrolina (Figura 21 d), identifica-se uma tendência positiva de ARM durante janeiro e fevereiro, com uma taxa de aproximadamente 4 mm / década. No restante do ano, a tendência é negativa. A redução máxima da ARM em Petrolina foi detectada nos meses de dezembro e abril, em aproximadamente -18 mm / década. Em Caruaru (Figura 21e), as tendências da ARM são negativas em março e abril (a -8 mm / década) e maio (-4 mm / década); nos demais meses, a tendência foi positiva, com a maior tendência em agosto (8 mm / década). Em Vitória (Figura 21b), a tendência para cada mês é predominantemente negativa, exceto em março e abril. O mês de janeiro apresentou a maior tendência negativa, de -8 mm / década. Em Recife (Figura 21c), houve tendências negativas durante maio, junho, agosto e setembro e tendências positivas nos outros meses.

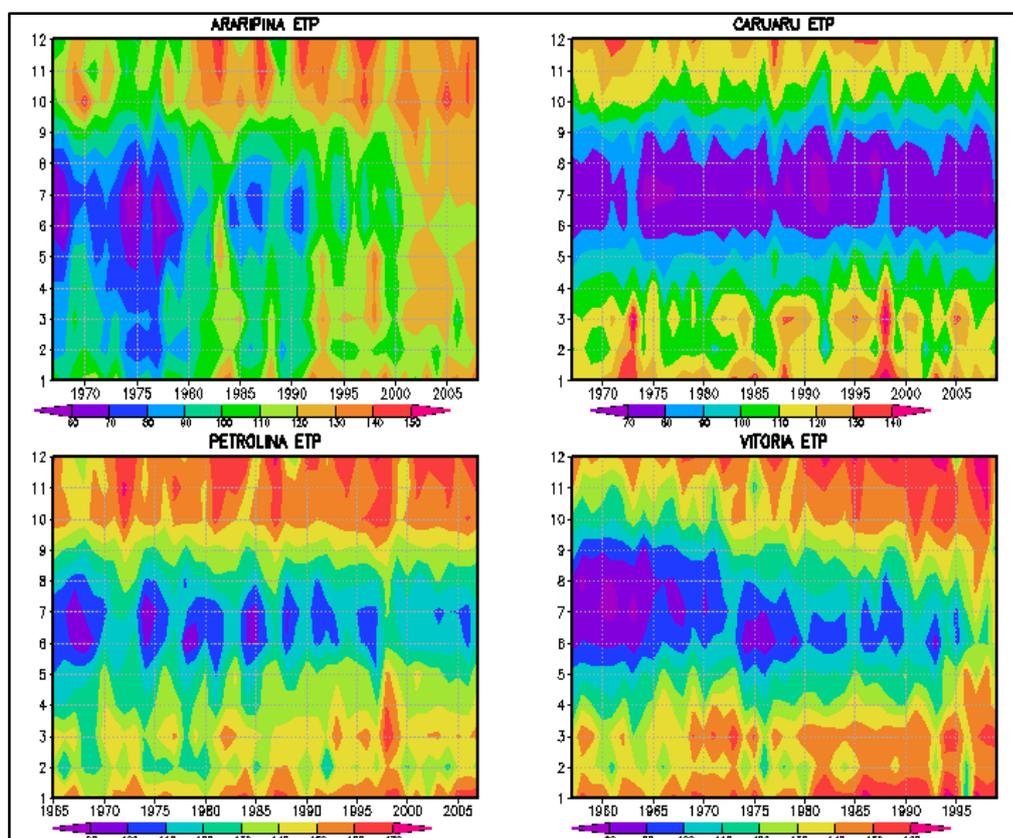
Figura 21–Tendência decenal de armazenamento (ARM) de água no solomensal (mm/década) em 40 anos de observação em (a) Araripina, (b) Vitória de Santo Antão, (c) Recife, (d) Petrolina, e (e) Caruaru.



A Figura 22 mostra a evolução mensal das ETPs ao longo dos anos nas cinco estações selecionadas. O destaque em Araripina/PE foi a grande variação das ETPs mensais

durante o período de janeiro a agosto. A taxa média de evapotranspiração potencial mensal passou de 60 mm para 120 mm igualando-se a ETP do período seco (período correspondente aos meses de outubro a dezembro). Também, foi possível verificar que houve um aumento significativo das ETPs diárias ao longo de toda a série estudada, destacando-se o desaparecimento dos valores de baixa evapotranspiração. Note-se que o aumento progressivo das taxas de ETP em Araripina é coerente com a elevação contínua das temperaturas nesta localidade. Comportamento similar ao de Araripina observou-se em Vitória de Santo Antão e, em menor grau, em Petrolina.

Figura 22 - Séries temporais anuais da evapotranspiração potencial (ETP) em mm/mês, para cada mês (eixo das ordenadas) para as localidades de Araripina/PE, Petrolina/PE, Caruaru/PE e Vitória de Santo Antão/PE.



Em Caruaru, constatou-se estacionariedade da série temporal de ETP ao longo dos anos, resultado coerente com o comportamento das tendências das temperaturas máximas (Figura 17). No geral, os cálculos do balanço hídrico evidenciaram aumento das taxas de ETP, nas décadas de 1950-60 a 2010 para todas as localidades estudadas, em destaque as localidades de Araripina e Vitória de Santo Antão que sugerem as maiores mudanças no comportamento das

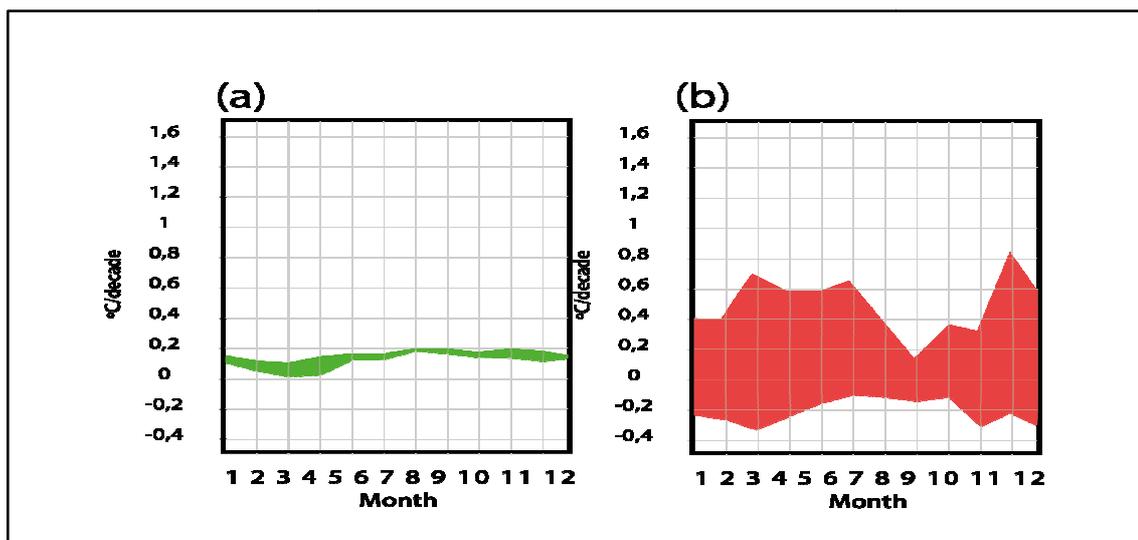
ETPs. No caso, do município de Caruaru, as variações das taxas de ETPs não mostram tendência ao longo do tempo.

4.3 ILHAS NO OCEANO ATLÂNTICO

Os regimes climáticos de Fernando de Noronha e Cabo Verde são semelhantes ao semiárido do Nordeste, em que a estação chuvosa é concentrada num período de três a quatro meses. As temperaturas elevadas ocorrem durante todo o ano e o vento é dominado pelos alísios de SE para Fernando de Noronha e de NE para Cabo Verde. No lado leste do Atlântico tropical, no Arquipélago de Cabo Verde, as tendências das séries temporais de temperatura na Ilha do Sal (Figura 23 b) mostram tendência positiva da temperatura máxima e negativa da temperatura mínima, à semelhança do que foi documentado em Araripina (Figura 17 a).

Em Recife e Fernando de Noronha, as tendências positivas de temperaturas mínimas foram maiores do que aquelas para a temperatura máxima observada durante todo o ano (Figuras 17 c e 23 a), indicando um aumento na frequência de noites quentes, o que pode ser uma consequência do aquecimento global. As diferenças marcantes entre as tendências de temperatura em Fernando de Noronha e Cabo Verde Atlântico Equatorial são notáveis (Figuras 23 a, b), indicando diferenças nos regimes climáticos nos quais se encontram.

Figura 23 - Tendência decenal das temperaturas máximas (linha contínua) e mínimas (linha tracejada) ($^{\circ}\text{C}/\text{década}$) para cada mês do ano nas estações meteorológicas de (a) Fernando de Noronha e (b) Cabo Verde.

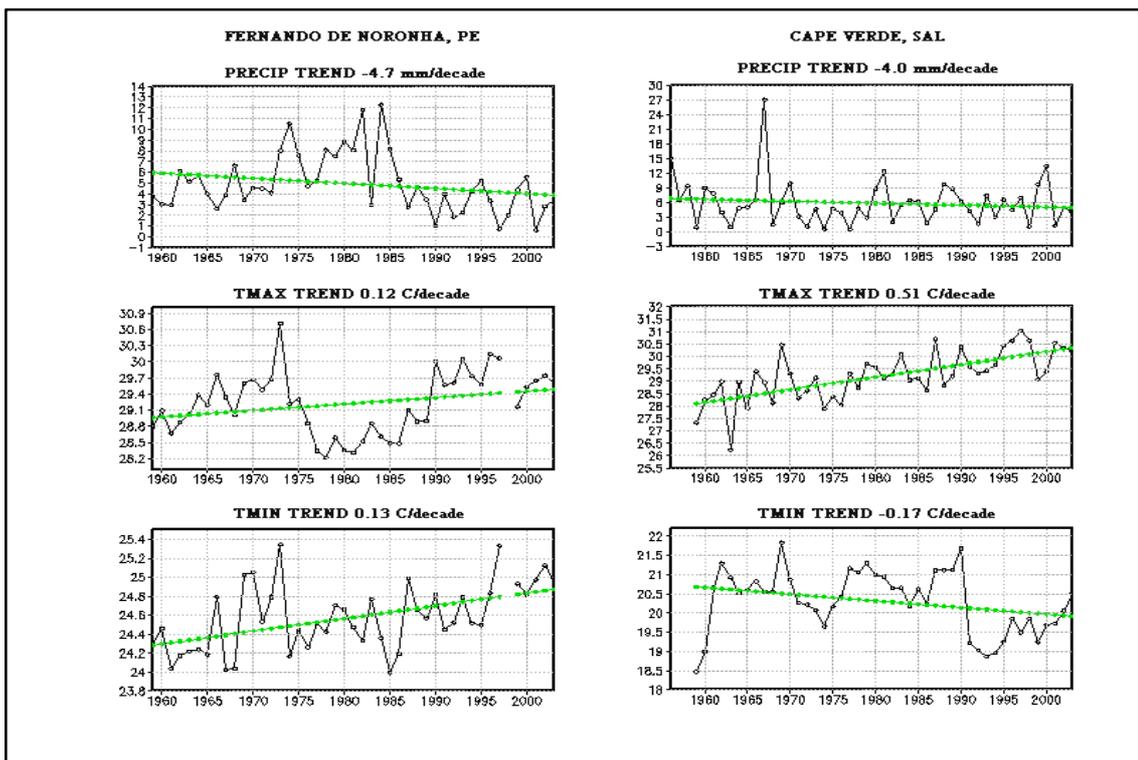


A Figura 24 mostra a tendência de precipitação e de temperatura para as Ilhas de Fernando de Noronha e do Cabo Verde ao longo 1956-2010. Note-se que as tendências de

precipitação para ambas as ilhas foram negativas: -4,0 e -4,7 mm / década em Cabo Verde e Fernando de Noronha, respectivamente, muito embora, as tendências de temperatura nas ilhas sejam diferentes. Enquanto as tendências de temperaturas máximas e mínimas são positivas em Fernando de Noronha (0,12 e 0,13°C/década, respectivamente), as tendências de temperatura em Cabo Verde são superiores e positivas (0,50°C/década), no entanto, negativas para as temperaturas mínimas (-0,17°C/década). Estes resultados indicam que Cabo Verde está passando por um processo de aridificação (Figuras 13 e 14) similar ao de Araripina.

A hipótese é que essas grandes diferenças nas tendências de temperatura ao longo de ambas as estações, nas Ilhas do Atlântico, são devido às massas de ar predominantemente marítimas que chegam a Fernando de Noronha depois de cruzar o Atlântico Sul, ao passo que as massas de ar que chegam a Cabo Verde têm características de deserto do Saara.

Figura 24 - Tendências de precipitação e temperatura em Fernando de Noronha (coluna esquerda) e Sal em Cabo Verde (coluna direita) no período de 1956-2010.



Tal evidência é suportada pelas diferenças nas estações; ventos quentes e secos chegam a Cabo Verde do Nordeste e ventos quentes e úmidos chegam a Fernando de Noronha do sudeste. Até agora, Fernando de Noronha representa uma localização ideal para a observação no longo prazo para as condições atmosféricas que não estão diretamente influenciados pelas atividades humanas ou massas de ar continentais. O montante seco da Ilha

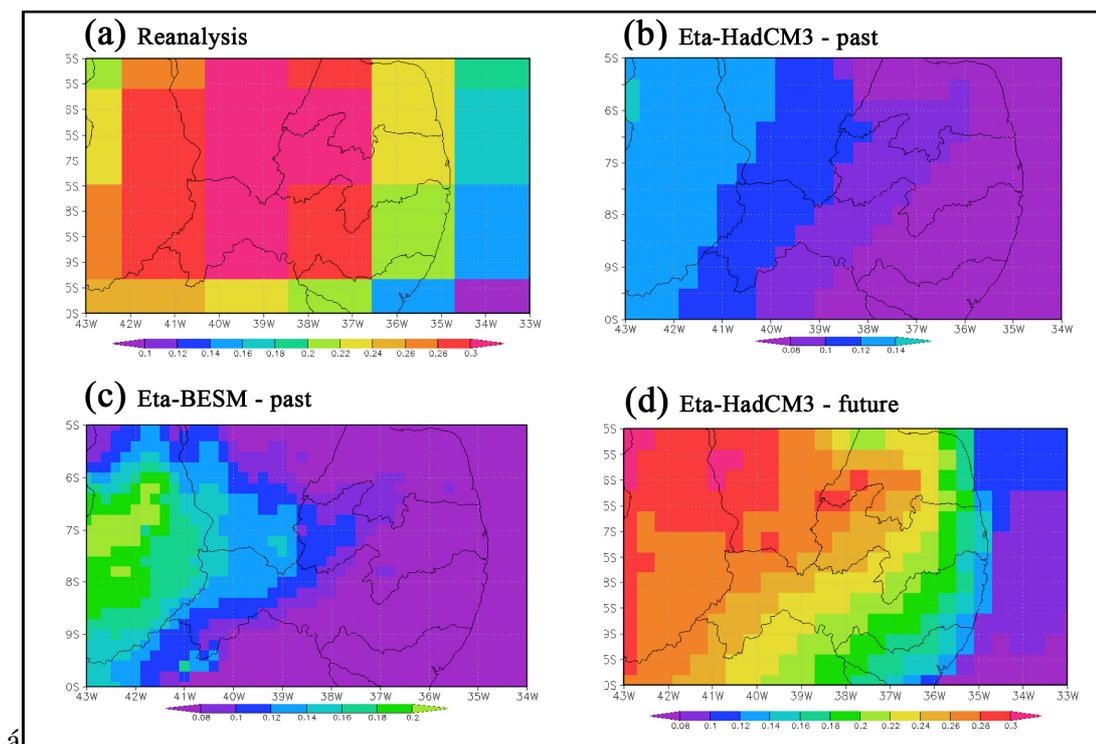
de Cabo Verde é fortemente influenciado pelas condições continentais vigentes sobre Sahel Africano.

4.4 RESULTADOS DA MODELAGEM

Este tópico apresenta os resultados das simulações climáticas, com o modelo atmosférico regional ETA e os modelos climáticos globais BESM e HadCM3, para o clima atual e HadCM3 para o clima futuro sobre o Nordeste.

A Figura 25 mostra as taxas de variação na temperatura simulada no Centro Nacional de Previsão Ambiental (NCEP - USA), dados de reanálise (Figura 25a); o clima simulado pelo modelo Eta aninhado ao HadCM3 para o presente (Figura 25b); a saída do modelo Eta aninhado ao BESM para o presente (Figura 25c); e a saída Eta-HadCM3 para o cenário futuro do clima (2010-2050) (Figura 25d). As semelhanças entre os padrões de mudanças de temperatura ao longo da região são mostradas na Figura 25, indicando um maior aquecimento no oeste da região, maior até do que o para as áreas próximas ao oceano.

Figura 25 - Tendências de temperatura(°C/década) simulada pelo (a) NCEP reanálises, (b) Eta-HadCM3 e (c) Eta-BESM de Janeiro 1960 a Dezembro 2000, e(d) Eta-HadCM3 cenário A2 de mudança climática para 2010-2050, para área de 13S-3S, 43W-38W



É importante constatar a concordância entre o padrão de aquecimento diferencial da região litorânea com o da região do interior do continente, com maior aquecimento constatado nas reanálises e capturado nas simulações com o modelo Eta, para o clima presente e futuro. O destaque vai para as simulações do clima para o futuro que preveem um aquecimento que é o dobro do valor simulado para o clima presente.

Comparando a simulação climática para o presente, o modelo regional não conseguiu representar a taxa de aquecimento já detectada pela reanálise. Vários fatores colaboram para tal subestimativa, entre elas ligada às mudanças no uso da terra no período, que estão indiretamente assimiladas nos dados da reanálise, mas que não são representadas nas simulações com o modelo atmosférico regional. Já a diferença das taxas de aquecimento entre as simulações numéricas do modelo regional são devidas às modificações nos campos das forçantes laterais provenientes do modelo global e das concentrações de CO₂ atmosférico do modelo regional, mantendo este a mesma vegetação em ambos os experimentos do clima presente e futuro. Assim, foi possível inferir que tais taxas diferenciais de aquecimento se devem ao aumento da concentração de CO₂ atmosférico utilizado em ambos os modelos global e regional. Os resultados das análises de tendências das temperaturas de superfície da reanálise e das simulações com o modelo regional Eta consideraram os valores médios na área de 3°S-13°S, 43°W-38°W.

Na comparação entre o clima presente e a reanálise, constatou-se que o modelo regional (Figura 25b) subestimou a taxa de aquecimento já ocorrida sobre a região Nordeste, representada nos campos de reanálise (Figura 25a). Uma das hipóteses para explicar tal sub-representação é o fato de que as reanálises incorporaram as temperaturas observadas sobre a região, as quais refletem, entre outros, as alterações de uso do solo, enquanto as simulações com o modelo atmosférico regional consideraram a manutenção da cobertura vegetal inalterada durante todo o período.

A Figura 25a, mostra a variação da temperatura à superfície, como simulada pelas reanálises do NCEP, com taxa de variação de 0,207°C/década. A variação da temperatura à superfície sobre a área descrita acima, como simulado pelo modelo Eta, para o período de 1960 a 2000, mostra uma taxa de aquecimento médio de 0,082°C/década o que corresponde a aproximadamente 50% da variação nas temperaturas oriundas da reanálise para o mesmo período. A simulação com o Eta para o clima futuro (2010-2050) mostra uma tendência positiva de 0,196°C/década. Tal como para os perfis de temperatura, para 2010-2050, o modelo mostra um padrão semelhante às simulações do passado (1960-2000), porém a

magnitude prevista é o dobro. Por exemplo, o cenário futuro para o lado ocidental do estado (Figura 25) produz um valor de $0,11^{\circ}\text{C}/\text{década}$ e um aquecimento futuro de $0,26^{\circ}\text{C}/\text{década}$.

A análise de tendências para as temperaturas do ar na superfície obtida com o modelo Eta-BESM para 1960-2000 (Figura 25c) mostra uma tendência positiva de $0,12^{\circ}\text{C}/\text{década}$ no Sertão e $0,06^{\circ}\text{C}/\text{década}$ para o restante do estado de Pernambuco. Estes valores de tendência foram resultados da integração do modelo com a concentração de CO_2 atmosférico fixada em 374 ppm, representando as condições climáticas atuais e cobertura de vegetação inalterada.

A Figura 26 mostra a tendência das temperaturas à superfície sobre a área descrita acima, simulada pelo modelo Eta implantado e integrado nos computadores do LAMEPE, para o período de 1960 a 2000, mostrando uma taxa de aquecimento médio de $0,83^{\circ}\text{C}/\text{século}$.

A Figura 27 mostra o cenário futuro das temperaturas à superfície, para uma área específica (8°S 38°W) do Nordeste do Brasil, no período de 2010 a 2050, com taxa prevista de aquecimento de $1,958^{\circ}\text{C}/\text{século}$.

Em relação à análise de simulação do clima, tanto com o NCEP Reanálise quanto com a do modelo Eta, as simulações do clima presente, de acordo com os dados utilizados, mostram um aquecimento mais grave na parte interior do estado de Pernambuco. Tal discrepância entre a reanálise e simulação Eta era esperada em razão aos efeitos advindos da cobertura vegetal e uso da terra, ao longo do tempo.

Figura 26 - Tendência das temperaturas simuladas com modelo ETA/Lamepe para (a) período de 1960-2000 ($^{\circ}\text{C}/\text{década}$) na área 8°S - 38°W .

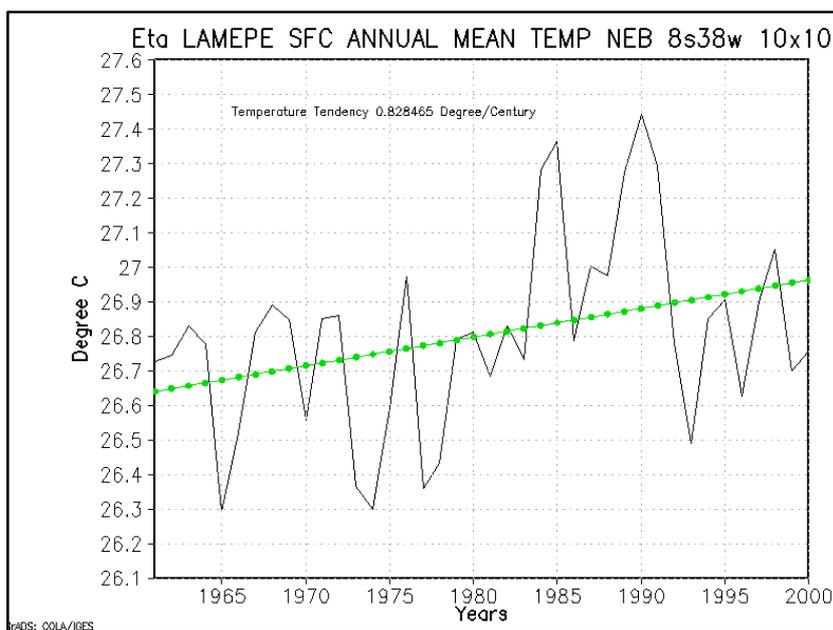
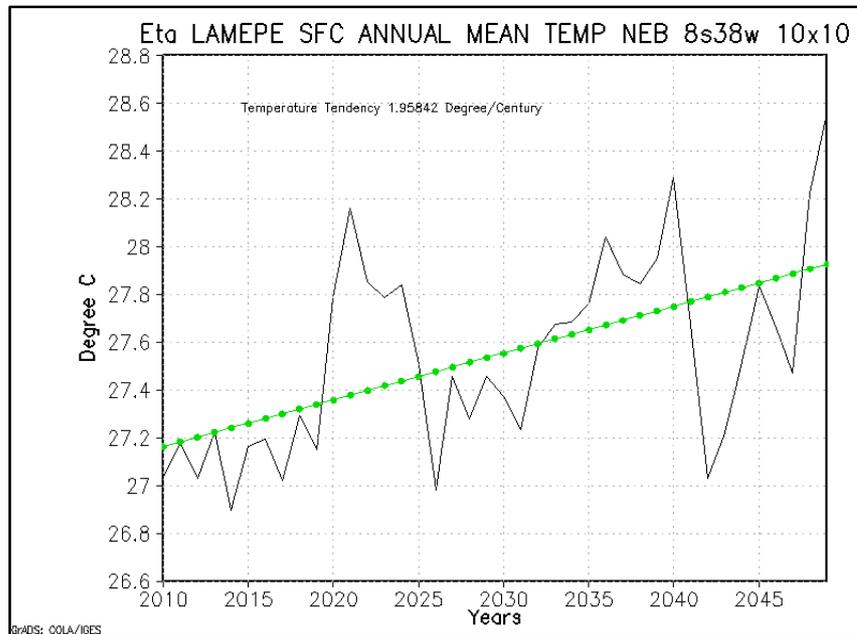
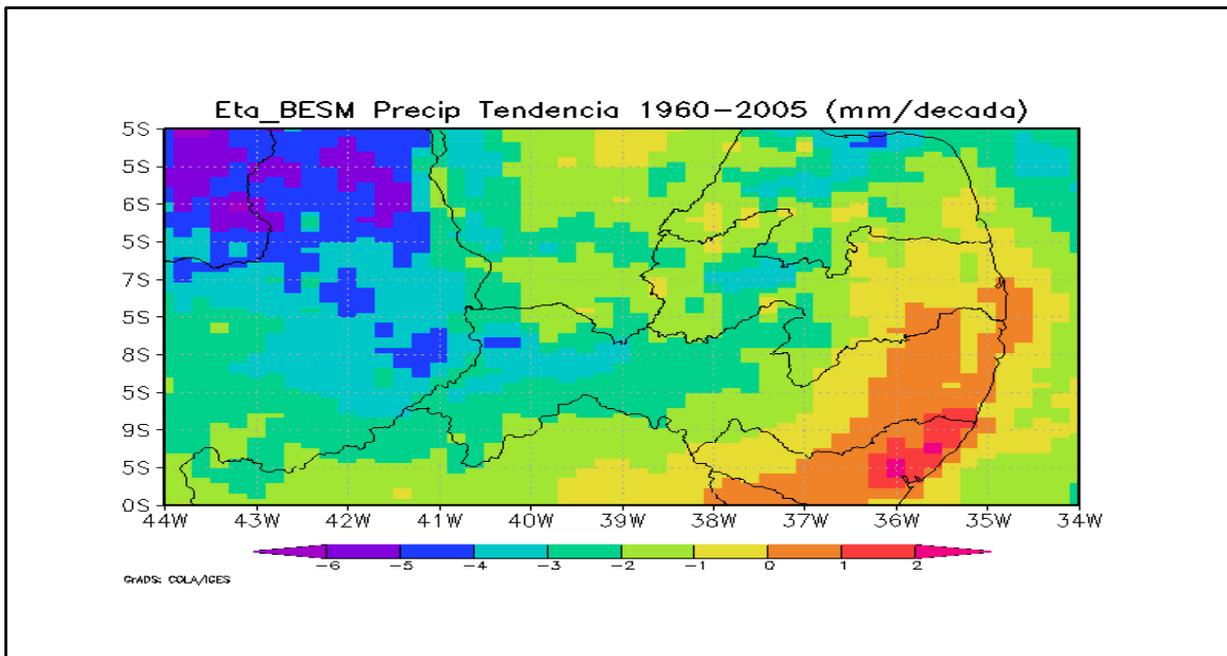


Figura 27 - Tendências das temperaturas simuladas com modelo ETA/Lamepe para o período de 2010 a 2050 (°C/década) corte para o Nordeste do Brasil.



A Figura 28 mostra os resultados das simulações para o tempo pretérito, com o modelo ETA/BESM, das tendências da precipitação para ao período de 1960 a 2005, recorte para Pernambuco. A simulação pretérita evidenciou maior tendência positiva de precipitação para setor leste (Zona da Mata e Litoral) e tendências negativas no setor oeste (Sertão e Agreste) de Pernambuco.

Figura 28 - Tendência de precipitação (mm/década), simulado com o modelo Eta/BESM para o período de 1960 a 2005

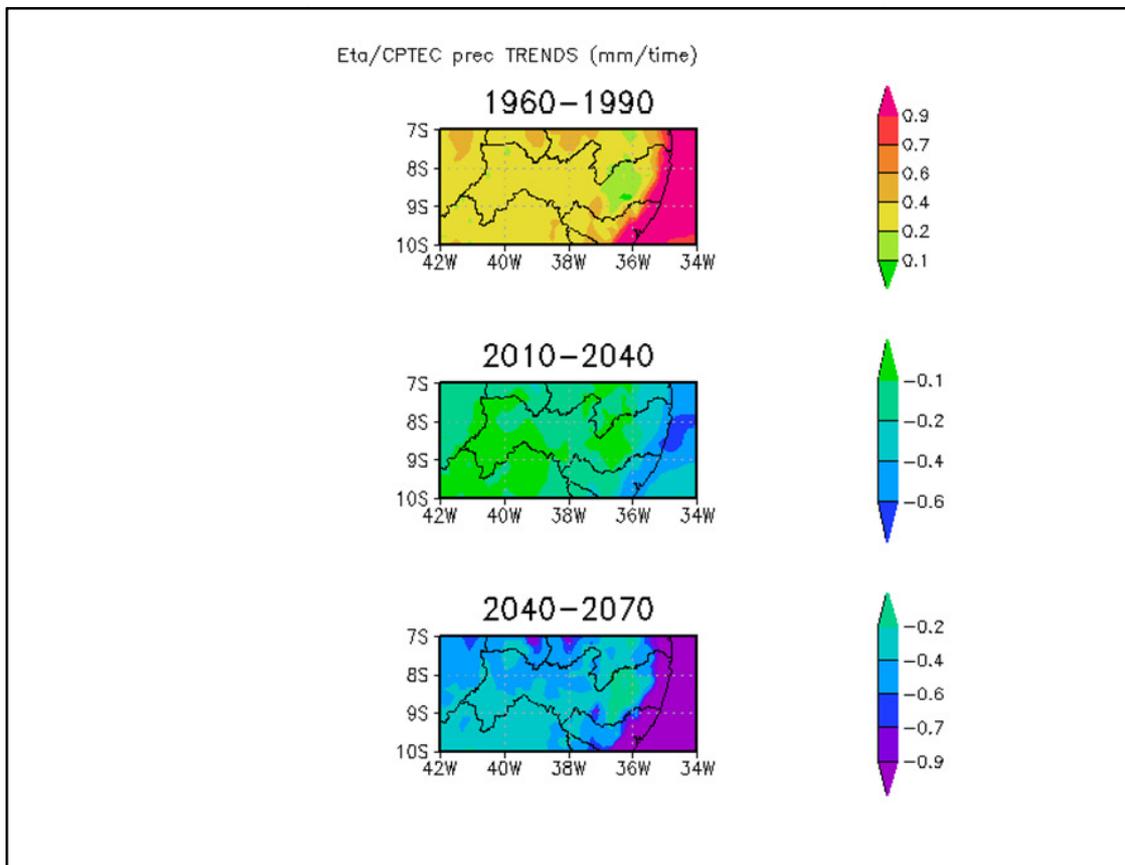


Os resultados das simulações de tendências da pluviometria simulados pelo modelo Eta-HadCM3 para os períodos pretéritos de 1960 a 1990 e futuros de 2010 a 2040 e 2040 a 2070 estão mostrados na Figura 29, em recorte para Pernambuco. Esses resultados mostraram que na simulação do clima presente, há uma tendência de aumento da precipitação sobre todo o estado (Figura 29 a), sendo as taxas mais expressivas ao longo do litoral. Este resultado contrasta com aquele simulado pelo Eta-BESM (Figura 28) na medida em que o primeiro corretamente simulou a diminuição dos totais pluviométricos sobre o semiárido, detectados nas análises de tendências das séries temporais de precipitação mostradas na seção anterior. Para o futuro, o modelo Eta-HadCM3 produziu um viés negativo de precipitação para todo estado.

No caso da simulação pretérita, se evidenciaram tendências maiores de precipitação para a Zona da Mata e Litoral e menores no setor oeste do estado (coerente com a climatologia). Já nas simulações para o futuro, os resultados mostraram que as tendências de precipitação são todas negativas, ou seja, há uma tendência de redução da precipitação para ambos os cenários futuros (2010 a 2040) e (2040 a 2070). Ressalta-se que as maiores tendências de redução da precipitação, a partir de 2010 até 2040, são previstas para o Agreste e Litoral de Pernambuco.

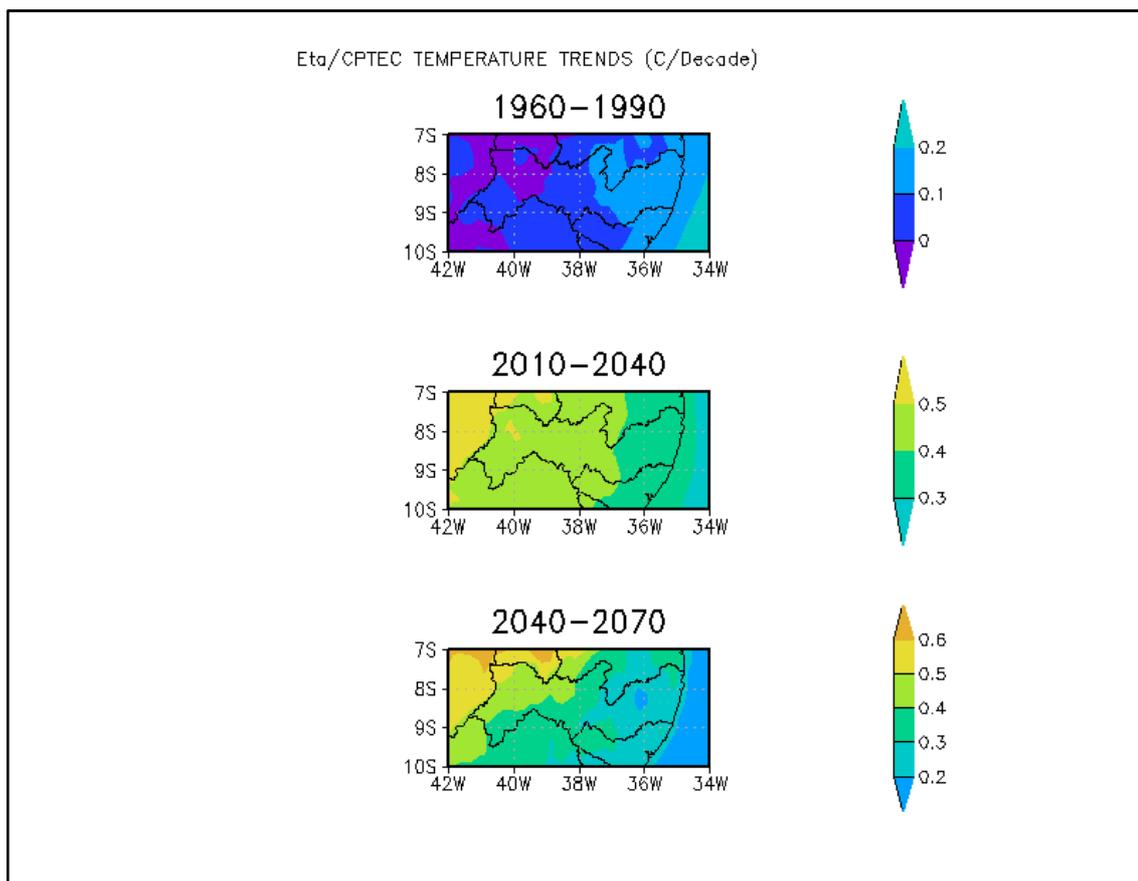
No período de 2010 a 2040 a tendência de redução prevista foi de -6 mm/década a -4 mm/década para o Litoral e Zona da Mata e, entre -4 mm/década e -1 mm/década, para o Agreste e Sertão. Para o período de 2040 a 2070 a previsão de redução é maior no setor leste, de -9 mm/década e de -6 a -2 mm/década para setor o oeste, respectivamente. Ou seja, o modelo prevê que a maior tendência de redução das precipitações, a partir de 2040, será no litoral e na Zona da Mata.

Figura 29 - Tendências de precipitação (mm/ano) simuladas com modelo ETA/CPTEC para Pernambuco para os períodos de 1960 a 1990; 2010 a 2040 e 2040 a 2070



Na Figura 30, se observa que as simulações para o futuro mostram aquecimento e que há tendência de aumento das temperaturas, tanto para o período que vai de 2010 a 2040 quanto para o entre 2040 a 2070. No primeiro período de simulação (2010 a 2040) a previsão das tendências de aumento das temperaturas é maior para o Sertão, com valores entre 0,4 a 0,5°C/década e previsão de tendências menores de aquecimento para áreas do setor leste onde os valores previstos oscilam entre 0,3 a 0,4°C/década.

Figura 30 - Tendências das temperaturas simuladas com modelo ETA/CPTEC para Pernambuco nos períodos de 1960 a 1990; 2010 a 2040 e 2040 a 2070 ($^{\circ}\text{C}/\text{década}$).



Para o segundo cenário futuro (2040 a 2070) a previsão de tendência ao aquecimento é ainda maior para o Sertão (até $0,5^{\circ}\text{C}/\text{década}$). Já para o setor leste (Agreste, Litoral e Zona da Mata) a previsão das tendências continuou positiva, com tendência ao aquecimento, porém com menor intensidade se comparada com o período anterior (2010 a 2040).

5- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A importância da realização desse tipo de pesquisa está na compreensão dos efeitos locais das mudanças regionais do clima. Pernambuco foi considerado “hotspot” em relação à mudança do clima fundamentalmente por sua vulnerabilidade a eventos extremos de secas e de chuvas. Os resultados aqui apresentados apontam para um futuro agravamento das tendências de mudanças climáticas já encontradas.

Os resultados encontrados evidenciaram a elevação pretéfica das temperaturas em todo o estado de Pernambuco, assim como uma tendência geral da redução da pluviometria anual. Com relação às análises das simulações climáticas para Pernambuco, constatou-se uma concordância com os padrões de aquecimento observados e simulados para o clima presente, bem como, as tendências à redução da precipitação na região do semiárido, como simulado pelo modelo Eta-BESM.

Os cenários futuros de mudanças climáticas também indicaram um agravamento das tendências de aumento das temperaturas do ar, relativamente aqueles simulados para o clima presente. Em particular, foram detectados sinais que são indicadores da presença de processos de aridificação no semiárido, em particular no município de Araripina, com o aumento da temperatura máxima anual de até 1,6°C/década e diminuição da temperatura mínima de até -0,4°C/década. Contrastando com os valores de elevação das temperaturas máxima e mínimas do Arquipélago de Fernando de Noronha, os valores de aumento das temperaturas no interior de Pernambuco sugerem que fatores locais como a alteração no uso do solo podem contribuir para a exacerbação das tendências de aquecimento detectadas nas localidades estudadas.

O cenário para futuras mudanças climáticas (2010-2050), devido ao aumento das concentrações atmosféricas de CO₂, resultou em tendências de temperatura que são duas vezes maiores que os simulados para o clima atual de acordo com o modelo Eta (1,96°C/século). Também, se evidenciaram tendências de aquecimento contrastantes da temperatura máxima sobre Fernando de Noronha e as ilhas de Cabo Verde. No primeiro caso, se detectou tendência de temperatura mais baixa em todas as estações utilizadas neste estudo, enquanto que o último um aumento muito acentuado da temperatura máxima, diminuição da temperatura mínima, assim como a diminuição de precipitação. Estes resultados mostram claramente que o processo de aridificação é grave em Cabo Verde, comparável ao observado em Araripina, na região semiárida de Pernambuco.

As análises comparativas com os dados das reanálises mostraram que o modelo Eta subestimou o aumento da temperatura sobre o Nordeste do Brasil. Infere-se que tal subestimativa seja devido à manutenção da cobertura vegetal nas simulações do modelo Eta, desconsiderando assim as variações dos fluxos de calor à superfície, decorrentes da antropização do bioma Caatinga, indiretamente incorporadas na assimilação de dados observados das reanálises. Os resultados das análises referentes aos balanços hídricos também revelaram perda da capacidade de armazenamento de água no solo, ao longo dos anos, para as localidades de Araripina e Petrolina.

Em síntese, os estudos realizados tiveram como propósito diagnosticar as mudanças climáticas atuais, como também, projetá-las para o futuro. Em Pernambuco, o setor mais exposto aos riscos da variabilidade climática e possível aridificação, devido às mudanças climáticas, é o Sertão de Pernambuco.

Dentre os resultados mais sólidos deste trabalho está a constatação dos maiores aumentos de temperatura no Sertão de Pernambuco, tanto no clima passado, quanto a cenarização para o clima futuro.

As tendências máximas diárias de temperatura são positivas em todas as estações, enquanto as tendências de temperaturas mínimas diárias são positivas ou negativas, indicando processos aridificação em Araripina, no Sertão, Caruaru, no Agreste e Cabo Verde no Atlântico Tropical. Tais sinais de aridificação são reforçados pelas tendências negativas nos totais anuais de precipitação na maioria dos locais estudados. Os cálculos do balanço hídrico corroboram essa afirmação.

A combinação das alterações do clima, na forma de falta e/ou pouca chuva acompanhada de altos valores de temperaturas e taxas altas de evapotranspiração associadas aos conflitos pelos usos múltiplos dos recursos hídricos, pode levar a uma crise de grandes proporções, sendo mais vulneráveis as populações que habitam o semiárido.

Essas análises revelaram a necessidade de se planejar e implementar medidas de mitigação e adaptação considerando este cenário desfavorável às práticas agrícolas de culturas exóticas para a região do semiárido do Nordeste brasileiro.

Entre as medidas, ressalta-se a possibilidade de criar mecanismos que promovam o melhor uso da água, evitando os desperdícios e reduzindo as perdas. Dessa forma, saberá não somente formas adequadas de uso como também tomar vantagem das especificidades do clima na região semiárida, para a produção agrícola e de energia.

Em paralelo a essas ações de mitigação, executar ações de redução das emissões de gases de efeito estufa e de adaptação às mudanças climáticas, tais como o aumento da capacidade de realizar previsões climáticas sazonais, capacitar as pessoas para as novas realidades econômicas, naturais e sociais que se desenvolverão no bojo das ações de mitigação e adaptação em curso, em escalas nacional e mundial. Para tanto, há que existir um programa massivo de investimento em educação integral. A escola integral, e não somente a educação ambiental é a única forma sustentada de preparação das futuras gerações do Brasil para a convivência, de forma harmônica, entre si e com o meio ambiente.

Em tempo, sugerem-se algumas ações de governo que poderiam ser adotadas e ampliadas para o convívio com as consequências das mudanças climáticas em curso, como por exemplo, desenvolver programas de reflorestamento, envolvendo todos os biomas, da Caatinga a Mata Atlântica, nas áreas rurais e urbanas, não exclusivamente pelo valor de florestas nativas para a estabilidade do clima e da biodiversidade, como também, pelo valor econômico que representam.

Importante lembrar que a região Nordeste guarda um enorme potencial de energia solar, inexplorada e inexaurível, que se incorporada à equação de desenvolvimento sustentável, econômico, ambiental, social, contribuirá para tornar o semiárido do Nordeste do Brasil e Pernambuco o primeiro, se não o único, no qual se aprendeu a extrair deste o que oferece abundantemente, com sabedoria e visão.

O planeta é indivisível e todos os seres humanos estão ligados a tudo e a todos: a vida é uma teia. A necessária mudança de paradigma fará com que as gerações futuras, em retrospectiva aos dias atuais, percebam o atual momento como a transição de uma sociedade autofágica que exauria os recursos naturais do planeta, poluía a água e o ar, extinguiu espécies animais e vegetais, para uma sociedade mais harmônica e coerente. Se não for concedido um conhecimento instintivo que mostre o que fazer, num mundo orientado pelo tecnicismo, há de se descobrir um jeito de encontrar um ecossistema seguro e equilibrado. Nesse contexto é urgente o desenvolvimento de mais pesquisas, para refinamento do conhecimento atual e maior controle dos processos tecnológicos.

REFERÊNCIAS

- ACEITUNO, P. *On the Functioning of the Southern Oscillation in the South-American Sector.1. SurfaceClimate*. **MonthlyWeatherReview**, 116, 1988 505-524.
- ALVES, J. M. B, REPELLI, C. A, MELLO, N. G. A pré-estação chuvosa do setor norte do Nordeste Brasileiro e sua relação com a temperatura dos oceanos adjacentes. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.8, p.22-30, 1993.
- ALVES, L. M.; CHOU, S. C.; MARENGO, J. A. 2004: **Avaliação das previsões de chuvas sazonais do modelo Eta/CPTEC climático sobre o Brasil**. Proc. XIII Cong. Bras. de Meteorologia, Fortaleza, Brasil, (in CD-ROM), 2004.
- ALVES, J. M. B. *et al.* Variações pluviométricas no Nordeste brasileiro: comparações com mudanças climáticas globais.**Revista Brasileira de Meteorologia**, **10**(1-2), 42-47. 1995
- ALVES, J. M. B. *et al.* Uma avaliação preliminar de simulações climáticas de um modelo regional espectral aninhado em um modelo global (ECHAM4.5) sobre o setor norte da região Nordeste do Brasil (1971-2000).**Revista Brasileira de Meteorologia**,**20**(2), 191-206. 2005
- ALVES, J.M.B. *et al.* Mecanismos atmosféricos associados a ocorrência de precipitação intensa sobre o Nordeste do Brasil durante janeiro 2004. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Brasil, 21(1), 56-76. 2006.
- AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P.; MARENGO, J. A.; PISNITCHENKO, I.; ALVES, L. M. **Cenários regionalizados de clima no Brasil para o Século XXI**: Projeções de clima usando três modelos regionais. Relatório 3, Ministério do Meio Ambiente - MMA, Secretaria de Biodiversidade e Florestas –SBF, Diretoria de Conservação da Biodiversidade – DCBio Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade - Sub projeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília, fevereiro, 2007.
- ARAGÃO, J. O. R. *A general circulation model investigation of the atmospheric response to El Niño*. [s.l.]: National Center for Atmospheric Research, (NCAR Cooperative Thesis, 100), p. 144, 1986.
- ASSAD, E. D.; PINTO, H. S. **AquecimentoGlobal e a Nova Geografia da produção agrícola no Brasil**. EMBRAPA-CEPAGRI, São Paulo, agosto, 82 p, 2008.

ATLAS DA BIODIVERSIDADE DE PERNAMBUCO. Secretaria de Ciência e Tecnologia de Pernambuco- SECTMA, Governo do Estado de Pernambuco. 86 p, 2002.

BARROS, A. H. C. *et al.* '**Climatologia das Estações Experimentais do IPA**'. Laboratório de Meteorologia e Recursos Hídricos de Pernambuco – LAMEPE, Recife, 1994, 137p.

BATES, B. *et al.* **IPCC technical Paper on Climate Change and Water**. Cambridge, united Kingdom and new York: IPCC, Cambridge university Press, 2008.

BLACK, T. L. The new NMC mesoscale Eta/CPTEC model: Description and forecast examples. *Wea.Forecasting*, 9, 265–278, 1994.

BOYLE, J. S. *Sensitivity of dynamical quantities to horizontal resolution for a climate simulation using the ECMWF (cycle 33) model*. **J. Climate**, 1993, v. 6, p. 796-815, 1993.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. **Diretrizes para a Política Nacional de Controle da Desertificação**. Brasília, 1998. 40p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretária de Recursos Hídricos. **Programa de ação nacional de combate à desertificação e mitigação dos efeitos da seca: PAN-BRASIL**. Brasília, DF, 213 p, 2004.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Relatório final do grupo de trabalho interministerial para a redelimitação do semi-árido nordestino e do polígono das secas. para a redelimitação do semi-árido nordestino e do polígono das secas**. Brasília, DF: MIN: MMA, 2005. 118 p. il.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Agenda 21** - Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (1992: Rio de Janeiro). Brasília: Senado Federal, Subsecretaria de Edições Técnicas, 1996. 585p. Disponível em: [http://www.ambiente.sp.gov.br/agenda21/ indice.htm](http://www.ambiente.sp.gov.br/agenda21/indice.htm)> Acesso em 10 de dezembro de 2009.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Instituto Nacional do Semiárido. **Plano Diretor do INSA, 2008-2011**. Brasília, DF, 2007. 70 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Atlas das áreas susceptíveis à desertificação do Brasil**. Brasília, DF, 134 p, 2007.

CANE, M. Decadal predictions in demand. **Nature Geoscience**, 3, 231-232. 2010.

CAVALCANTI, I.; MARENGO J.; SATYAMURTY. P.; NOBRE C. A.; TROSNIKOV, I.; BONATTI, J. P.; MANZI, A. O.; TARASOVA, T.; PEZZI, L. P.; D'ALMEIDA, C.;

- SAMPAIO, G.; CASTRO, C. C.; SANCHES, M. B.; CAMARGO, H. *Global climatological features in a simulation using the CPTEC/COLA AGCM*. **J. Climate**. 15: 2965–2988, 2002.
- CHOU, S. C.; TANAJURA, C. A. S.; XUE, Y.; NOBRE, C. A. *Validation of the coupled Eta/CPTEC/SSiB model over South America*. **Journal Geophysical Research**, v. 107, n. D20, p. Doi: 10.1029/2000JD000270, Oct. 2002. 34, 37. 2002
- CHOU, S. C.; BUSTAMANTE, J. F.; GOMES, J. L. **Previsões sazonais utilizando o modelo Eta/CPTEC sobre América do Sul**. Proc. XIII Cong. Bras. de Meteorologia, Fortaleza, Brasil, (in CD-ROM), 2004.
- CHOU, S. C.; BUSTAMANTE J. F.; GOMES, J. *Evaluation of ETA model seasonal precipitation forecast over South America*. **Nonlinear Process in Geophysics**, v.12, p. 537-555, 2005.
- CHOU, S. C, MARENGO, J. A, LYRA, A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J.; ALVES, L. M.; KAY, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. *Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs*. **Climate Dynamics**. DOI 10.1007/s00382-011-1002-8, 2011.
- CHU, P. S. *Brazil's climate anomalies and ENSO. Teleconnections linking worldwide climate anomalies*. M. H Glantz, R. W. Katz, and N. Nicholls, Eds. Cambridge University Press, p. 43-71, 1991.
- CHU, P. S. *Time and space variability of rainfall and surface circulation in the northeast Brazil – Tropical Atlantic sector*. **J. Meteorol. Soc. Japan**, 62, 363-370, 1984.
- DATSENKO, N. M. *et al.* Variações pluviométricas no Nordeste brasileiro: comparações com mudanças climáticas globais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 10(1-2), 42-47. 1995.
- DETTINGER, M. D. *et al.* **Interannual and interdecadal variability in United-States**. 1995
- DICKINSON, R. E., *et al.* *Regional climate model for the western United States*. **Climatic Change**, 1989, v. 15, p. 383-422, 1989.
- DICKINSON, R. E., *et al.* Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as coupled to the NCAR Community Climate Model. NCAR Tech. Note NCAR/ TN-3871STR, 72 pp, 1993.

FREITAS, M., Vulnerabilidade e impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos. Núcleo de Assuntos Estratégicos (NAE) da Presidência da República, Secretaria de Comunicação de Governo e Gestão Estratégica, Brasília, DF. **Cadernos NAE** nº 3. 2005

FREITAS, M. A.; SOITO, J. L. S. Energia e recursos hídricos: vulnerabilidade, impactos e possibilidades de adaptação da energia hidroelétrica no Brasil às mudanças climáticas globais. pp. 177-216. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). *Parcerias Estratégicas*, 27, 360 pp. 2008.

FRICH, P. *et al.* *Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century.* **Climate Res.**, 19, 193–212, 2002.

GHIL, M.; VAUTARD, R. *Interdecadal oscillations and the warming trend in global temperature time-series.* **Nature**, 350, 324–327. 1991.

GIONGO, V. **Balanco de Carbono no semiárido brasileiro: Perspectivas e Desafios em: Desertificação e Mudanças Climáticas no Semiárido Brasileiro.** Editores: R. C. C. Lima, A. M. B. Cavalcante e A. M. P. Marin, Instituto Nacional do Semiárido - INSA, pp 115-130, ISBN: 978-85-64265-02-8, 2011.

GIORGI, F. *On the simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model.* **Journal of Climatology**, 3, 941-963, 1990.

GORDON, L. J. *et al.* *Human modification of global water vapor flows from the land surface.* **Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.** 102, 7612–7617, 2005.

GUEDES, R. G. *et al.* Modulação do ciclo anual de variáveis de superfície em São Luís (Maranhão) por oscilações de baixa frequência. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 21(2), 245-255. 2006:

HAMEED, S. K. R.; MEINSTER, A. *Teleconnections of the Southern Oscillation in the tropical Atlantic sector in the OSU coupled upper ocean-atmosphere GCM,* **J. Climate**, 6, 487–498, 1993.

HASTENRATH, S.; HELLER, L. *Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil.* **Quart. J. R. Meteor. Soc**, v. 110, p. 411-425, 1977.

HASTENRATH, S. *Interannual variability and annual cycle: mechanisms of circulation and climate in the tropical Atlantic.* **Mon. Wea. Rev.**, 112, 1097-1107, 1984.

_____. *Prediction of Northeast Brazil rainfall anomalies*. **J. Climate**, **3**, 893-904, 1990.

_____. *Interannual and Longer-Term Variability of Upper Air Circulation in the Northeast Brazil - Tropical Atlantic Sector*. In: **J. Geophys Res.**, n.105, p. 7327-7335, 2001.

HASTENRATH, S.; CASTRO, L. C.; ACEITUNO, P. *The Southern Oscillation in the tropical Atlantic sector*. **Contrib. Atmos. Phys.**, **60**, 447-463, 1987.

HASTENRATH, S.; GREISCHAR, L. *Further Work on the Prediction of Northeast Brazil Rainfall Anomalies*. **J. Climate**, v. 6, p. 743-758, 1993.

HAYLOCK, M. R. *et al.* *Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature*. **J. Climate**, v. 19, p. 1490-1512, 2006.

HUDSON, D. A.; JONES, R. G. *Regional climate model simulations of present-day and future climates of southern Africa*. Hadley Centre Technical Note 39, Hadley Centre for Climate Prediction and Research. Met Office, Bracknell, U.K. 2002.

HULME, M.; CARTER, T. R. *Representing uncertainty in climate change scenarios and impact studies pp.11-37*. In: **Representing uncertainty in climate change scenarios and impact studies Proceedings of the ECLAT-2 Helsinki Workshop, 14-16 April, 1999** (eds.) Carter, T. R., Hulme, M. and Viner, D. Climatic Research Unit, Norwich, UK, 128pp. 1999.

INFOCLIMA, **Boletim de Informações Climáticas do Estado de Pernambuco**. Ano VI, N° 02, 2001 e Ano VII, N° 02, 2002.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, 2001.

_____. *Climate Change: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Solomon, S.; D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp, 2007a.

_____. *Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth

Assessment Report of the IPCC. M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden and C. E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 pp, 2007b.

_____. *Summary for Policymakers*. In: Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE / Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC. **Revista Climanálise**. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br>, 2006. Acesso em: 08 de julho. 2014.

_____. Disponível em: <<http://pmtcrh.cptec.inpe.br/livro/nucleopernambuco.shtml>>. Acesso em: 08 de julho. 2014.

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*. Met Office Hadley Centre, Exeter, Uk, 40pp, April 2004.

JANJIC, Z. I. The step-mountain Eta/CPTEC coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927–94, 1994.

KABAT, P. *et al.* (Eds.), *Coping with Climate Variability and Climate Change in Water Resources: a Scoping Paper* [Kabat, P. *et al.* (Eds.)]. *Dialogue on Water and Climate (DWC), DWC-Report n° DWCSSO-01*, International Secretariat of the Dialogue on Water and Climate, Wageningen, Netherlands. 2002.

KAYANO, M. T. *et al.* *Tropical circulations and the associated rainfall anomalies during two contrasting years*. **J. Climatol.**, **8**(5), 477-488. 1988

KAYANO, M. T; OLIVEIRA C.P.; ANDREOLI R. V. *Interannual relations between South American rainfall and tropical sea surface temperature anomalies before and after 1976*. **International Journal of Climatology**, v.29, p.1439-1448, 2009.

KEPPENNE, C. L.; GHIL, M. *Adaptive filtering and prediction of the Southern Oscillation Index*. **J. Geophys. Res.**, **97** (D18), 20449-20454. 1992a

KEPPENNE, C. L.; LALL, U. *Complex singular spectrum analysis and multivariate adaptive regression splines applied to forecasting the Southern Oscillation*, **Exp. Long Lead Forecast Bull.**, **5**, 54-56. 1996.

KOUSKY, V. E., KAYANO, M., CAVALCANTI, I.F.A. *A review of the Southern Oscillation: oceanic-atmospheric circulation changes and related rainfall anomalies*, **Tellus**, **36A**, 490-504, 1984.

Kousky, V. E; *Frontal influences on Northeast Brazil*. **Montly Weather Review**. **107**, 1140-1153.1979.

KOUSKY, V. E. *The global climate for December 1986-February 1987: El Niño returns to the Tropical Pacific*. **Mon. Wea. Rev.**, v.115, p.2822-2838, 1988.

KUNDZEWICZ, Z. W. *et al. Freshwater resources and their management*, pp. 173-210. **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [Parry, M.L. (Eds.)], Cambridge, UK, New York, NY: Cambridge University Press. 2007.

LACERDA, F. F. *et al.*; **Um Estudo de Detecção de Mudanças Climáticas no Semi-árido de Pernambuco** In: III Simpósio Internacional de Climatologia, Canela-RS, 2009.

_____. **Detecção de sinais de mudanças climáticas para algumas localidades do Sertão do Pajeú – PE**. Anais do XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 22 a 25 de Setembro de 2009.

LACERDA, F. L.; VIEIRA DE MELO, A. V. P.; SOARES, D, B. **Análise preliminar na detecção de tendências no padrão pluviométrico na Bacia do Pajeú – PE: Mudanças climáticas ou variabilidade?** In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009, Campo Grande-MT. Anais, CD ROM, 2009^a.

LACERDA, F. F.; SILVA JÚNIOR, H. D. da, ASSAD, E. D., ASSIS, J. M. O., MOURA, M. S. B. **Extremos e variabilidade climática no Nordeste brasileiro e em Pernambuco** In: **Mudanças Climáticas e Impactos Ambientais** / organizador JosicledaDomicianoGalvêncio – Recife : Ed.Universitária da UFPE, 342 p. 1-23, 2010.

LACERDA, F. F.; NOBRE, P.; LOPES, G. M. B. **O Clima e suas Alterações em Pernambuco** In: **Mudanças Climáticas e Resiliência de Cidades** / organizadores Fátima

Furtado, Luiz Priori, Ednéa Alcântara – Recife:Pickimagem, 61-72, 2015^a.ISBN 9788569110002 253p.

LACERDA, F. F.; NOBRE, P.; SOBRAL, M. C.; LOPES, G. M. B.; CHAN, C. S. BRITO, E. *Long term climate trends over Nordeste Brazil and Cape Verde. Journal of Earth Science & Climatic Change.* 2015^b.

LIMA, K.C., PITIÁ, A.M.A. & SANTOS, J.M. dos. Uma contribuição aos estudos de GeomorfologiaClimática em ambiente Semiárido na região Sudoeste da Bahia. In: Simpósio Nacional de Geomorfologia. 6, 2006.Anais.Goiânia, 2006.CD-ROM.

LIU, Y.; GIORGI, F.; WASHINGTON, W. M. *Simulation of summer monsoon climate over East Asia with an NCAR Regional Climate Model.Monthlyweatherreview*, 122, 2331-2348, 1994.

MACHADO, R.D.; DA ROCHA, R.P. Previsões climáticas sazonais sobre o Brasil: avaliação do RegCM3 aninhado no modelo global CPTEC/COLA. Rev. bras. Meteorol.vol.26no.1São PauloMar.2011. Consultado em <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862011000100011>

MAGALHÃES, A. R.*et al. The effects of climate variations on agriculture in Northeast Brazil.* In: **The Impact of Climate Variations on Agriculture.** Vol 2.Assessments in Semi-Arid Regions. Eds. M. Parry, T. Carter, N. Konijn. Kluwer Academic Publishers, pp. 277-304, 1988.

MAGRIN, G.; GAY GARCÍA, C.; CRUZ CHOQUE, D.; GIMÉNEZ, J. C.; MORENO, A. R.; NAGY, G. R.; NOBRE, C. A.; VILLAMIZAR, A., *LatinAmerica. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability.* Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 581-615. 2007.

MARENGO, J. A.; HASTENRATH, S. *Case studies of extreme climatic events in the Amazon basin.JournalofClimate*, n.6, v.4, p. 617-627, 1993.

MARENGO, J. A., SOARES, W. **Impacto das modificações da mudança climática.** Síntese do Terceiro Relatório do IPCC. Condições climáticas e recursos hídricos no Norte do Brasil. Clima e Recursos Hídricos 9. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, FBMC-ANA. Porto Alegre, Brasil, p. 209-233, 2003.

MARENGO, J. A. *Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin*. **Theoretical and Applied Climatology**. v.78, p.79-96, 2004.

_____. Cenários de Mudanças Climáticas para o Brasil em 2100. **Ciência & Ambiente**. v.34, p.100-125, 2007b.

_____. Água e mudanças climáticas. In: **Estudos Avançados**. 22 (63), p.83-96. 2008.

_____. **Caracterização do Clima no século XX e Cenários no Brasil e na América do Sul para o Século XXI derivados dos Modelos de Clima do IPCC**. Relatório No.1. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2007. 181 p

_____. **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. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, v.1. p. 214, 2006.

MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; ALVES, L.; NOBRE, C. A.; PISNITCHENKO, I. **Atlas de Cenários Climáticos Futuros do Brasil**. Cachoeira Paulista, SP: CPTEC - INPE, 2007. 124p.

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**. Edição no. 08, p. 5-28, 2007.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C.; DA ROCHA, R. LABORBE, R. **Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais**. Relatório 5, Ministério do Meio Ambiente - MMA, Secretaria de Biodiversidade e Florestas – SBF, Diretoria de Conservação da Biodiversidade – DCBio Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade - Sub projeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília, fevereiro. 2007.

MARENGO, J. A.; SILVA D. P. **Mudanças climáticas globais e seus impactos nos recursos hídricos** In: Águas Doces no Brasil - capital ecológico, usos múltiplos exploração racional e conservação. Aldo da Cunha Rebouças, Benedito Braga Jr., José Galizia Tundisi, Eds. 2ns Ed. IEA/USP, p. 63-109, 2007.

MARENGO, J. A. *et al.* **Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o século XXI**: Projeções de clima futuro usando três modelos

regionais. Relatório 5, Ministério do Meio Ambiente – MMA, Secretaria de Biodiversidade e Florestas – SBF, Diretoria de Conservação da Biodiversidade – DCBio Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade – Sub projeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília, fevereiro, 2007a.

MARENGO, J. A.; JONES R.; ALVES L. M.; VALVERDE M. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *Int. J. Climatol.* doi:10.1002/joc.1863, 2009a

MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, P., ALVES, L. M.; CUADRA, S. V.; VALVERDE, M. C.; FERRAZ, S. E. T.; TORRES R. R.; SANTOS D. C. Future change of climate in South America in the late XXI Century: Intercomparison of scenarios from three regional climate models. *Climate Dynamics*. DOI 10.1007/s00382-009-0721-6, 2009b.

MARENGO, J. A., CHOU, S. C.; BETTS, R.; KAY, G.; ALVES, L. M.; TORRES, R.; SANTOS, D. Development of regional climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: Part 1. Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Parana River Basins, *Climate Dynamics*, 2010.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; BEZERRA, E. A.; LACERDA, F. F. **Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro** In: Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. 1 ed. Campina Grande. Instituto Nacional do Semiárido, v.1, p. 383-416, 2011.

McCABE, G. J.; MARKSTROM, S. L. *A Monthly Water-Balance Model Driven By a Graphical User Interface*, p. 11, 2007.

MCGREGOR, J. L.; WALSH, K. J.; KATZFEY, J. J. *Nested modelling for regional climate studies*. Modelling change in environmental systems. Chichester: Wiley. p.367-386, 1993.

MARKHAM, C. G. and MCLAIN D. R. *Sea surface temperature related to rain in Ceará, northeastern Brazil*. *Nature*, **265**, 320-325, 1977.

MENÉNDEZ, C. G.; SAULO, A. C.; Li. Z. X. *Simulation of South American wintertime climate with a nesting system*. *Clim. Dyn.* 17:219-231, 2001.

MESINGER, F., Z. I. Janjic, S. Nickovic, D. Garilov, and D. G. Deaven: The step-mountain coordinate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of an Appalachian redevelopment. *Mon. Wea. Rev.*, 116, 1493–1518, 1988.

METZ, B.; DAVIDSON, O. R.; BOSCH, P. R.; DAVE, R.; MEYER, L.A. *Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

MILLY, P. C. D. *et al.*, *Stationarity is dead: whither water management?* *Science*, 319(5863), 573-574. 2008

MISRA, V.; DIRMEYER, P. A.; KIRTMAN, B. P. *Dynamic downscaling of seasonal simulations over South America*. *J. Climate* 16:103–117, 2003.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Atlas das áreas susceptíveis à desertificação do Brasil**. Brasília, DF, 134 p, 2007

MOLION, L. C. B. Climatologia dinâmica da Região Amazônica: mecanismos de precipitação. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 2, p.107-117, 1987.

_____. *Amazonian rainfall and its variability*. In: *Hydrology and Water Management in the Humid Tropics*, Ed., p. 99-111, Cambridge University Press, Cambridge, 1993.

MONCUNILL, D. F.; SILVA, E. M.; SILVA FILHO, V.; MELCÍADES, W. L. B.; COSTA, A. A.; SUN, L.; MOURA, A. D.; NOBRE, P. **Uma Breve Descrição do Sistema de Previsão Climática Regionalizada (Downscaling Dinâmico) Implantado na Funceme**. Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, realizado de 04 a 09 de Agosto de 2002 em Foz do Iguaçu, PR, 2002.

MONCUNILL, D. F. *The rainfall trend over Ceará and its implications*. In 8ª Conferência Internacional de Meteorologia e Oceanografia do Hemisfério Sul, Foz do Iguaçu, Abr. 2006, pp. 315-323, 2006

MOURA, A. D.; SHUKLA, J. *On the dynamics of droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model*. *J. Atmos. Sci*, v. 38, p. 2653-2675, 1981.

MOURA, A. D.; HASTENRATH, S. *Climate prediction for Brazil's Nordeste: Performance of empirical and numerical modeling methods*. **J. Climate**, 17, 2667-2672. 2004.

MUCLIFE - Instituto de Tecnologia de Pernambuco – ITEP - SECTMA (PE)
<http://muclife.wikispaces.com>http://www.itep.br/siteteste/images/arquivos_itep/relatorio-tividades-2008. Acesso em: 08 de julho de 2014.

NAMIAS, J. *Influence of northern hemisphere general circulation on drought in northeast Brazil*. **Tellus**, v.24, p.336-342, 1972.

NICOLINI, M.; SALIO, P.; KATZFEY, J.J.; MCGREGOR, J. L.; SAULO, A.C.; *January and July regional climate simulation over South American*. **J. Geophys Res** 107 (NO. D22): 4637, 2002.

NOBRE, C. A.; ASSAD, E. D. “**Aquecimento Global e o Impacto na Amazônia e na Agricultura Brasileira**”. - INPE Eprint: Disponível em: <http://www.sid.inpe.br/ePrint@80/2005/09.12.12.51> v.1, 2005.

NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L. **Cenários de Mudança Climática para a América do Sul para o Final do Século 21**. In: Parcerias Estratégicas. Mudança do Clima no Brasil: Vulnerabilidade, Impactos e Adaptação. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. CGEE. Número 27. pp: 19-42. Brasília, DF. 2008.

NOBRE, P. *On the genesis of anomalous SST and rainfall patterns over the tropical Atlantic basin*. Ph.D. Dissertation, University of Maryland at College Park, 151 pp, 1993.

_____. A Variabilidade Interanual do Atlântico Tropical e sua Influência no Clima da América do Sul. **Revista Climanalise**. Edição comemorativa de 10 anos, 1996.

_____. *On the genesis of anomalous SST and rainfall patterns over the tropical Atlantic basin*. Ph.D. Dissertation, University of Maryland at College Park, 151 pp, 1993.

NOBRE, P.; SHUKLA, J. *Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America*. **Journal of Climatology**, v.9, p. 2464-2479, 1996.

NOBRE, C. A.; CITEAU J.; UVO, C. R. B. A note on ITCZ migration in the tropical Atlantic and rainfall anomalies in Northeast Brazil. Unpublished manuscript, 1989.

NOBRE, P.; ZEBIAK, S. E.; KIRTMAN, B, P. *Local and remote sources of tropical atlantic variability as inferred from the results of a hybrid ocean-atmosphere coupled model: Special*

section: *Climate variability and predictability/tropical Atlantic variability (CLIVAR)*. **Geophysical research letters**, 2003.

NOBRE, P.; MALAGUTTI, M. **Uma avaliação do modelo de circulação geral do CPTEC para estudos de modelagem acoplada oceano-atmosfera**. In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Fortaleza, Brasil, 2004.

NOBRE, P.; MARENGO, J. A.; CAVALCANTI, I. F. A.; OBREGON, G.; BARROS, V.; CAMILLONI, I.; CAMPOS, N.; FERREIRA, A. G. *Seasonal-to-Decadal Predictability and Prediction of South American Climate*. **J. Climate**, **19**, 5988–6004, 2006.

NOBRE, P.; MALAGUTTI, M.; URBANO, D. F.; ALMEIDA, R. A. F. de; GIAROLLA, E. *Amazon deforestation and climate change in a coupled model simulation*. **J. Climate**, **22**, 5686-5697, 2009.

NOBRE, P. **Mudanças Climáticas e desertificação: os desafios para o Estado Brasileiro**. In: *Desertificação e Mudanças Climáticas no Semiárido Brasileiro*. Editores: R. C. C. Lima, A. M. B. Cavalcante e A. M. P. Marin, Instituto Nacional do Semiárido - INSA, pp 25-35, ISBN: 978-85-64265-02-8, 2011.

NOBRE, P. SIQUEIRA, L. S. P.; ALMEIDA, R. A. F. de; MALAGUTTI, M.; GIAROLLA, E.; CASTELÃO, G. P.; BOTTINO, M. J.; KUBOTA, P.; FIGUEROA, S. N.; COSTA, M. C.; BAPTISTA JR. M.; IRBER JR. L.; MARCONDES, G. G. *Climate simulation and change in the Brazilian Climate Model*. **J. Climate**, **26**, 6716-6732, DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00580, 2013.

OYAMA, M. D., NOBRE, C. A. A new climate-vegetation equilibrium state for Tropical South America. **Geophysical Res. Letters**, v. 30, n. 23, p.2199-2203, 2003.

OYAMA, M. D. e NOBRE, C. A. *Climatic consequences of a large-scale Desertification in Northeast Brazil: A GCM Simulation Study*. **J. Climate**, **17**, p.3203-3214, 2004.

PACHAURI R. K.; REISINGER, A. *Climate Change: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007.

PARRY, M. L.; CANZIANI, O. F.; PALUTIKOF, J. P.; VAN DER LINDEN, J. P.; HANSON C. E. *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 pp, 2007.

PBMC - PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Sumário Executivo GT1. PBMC, Rio de Janeiro, Brasil. 24 p, 2013.

PEDRÃO, F. C. **Rever o semi-árido**. Bahia Análise & Dados, Salvador. v. 18, p. 193-199, 2008.

PNMC - PLANONACIONAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA. GOVERNO FEDERAL.COMITÊ INTERMINISTERIAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA Decreto nº 6.263, de 21 de novembro de 2007. Brasília, 125 p. 2008.

PERNAMBUCO. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente. **Atlas de Bacias Hidrográficas**. Recife, Pernambuco. 103 p. 2006.

_____. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente (Semas). Plano Estratégico Ambiental de Pernambuco. Governo do Estado de Pernambuco. Maio de 2007. <http://www.comunidades.pe.gov.br/web/sectma/exibirartigo?companyId=communis.com.br&articleId=2283>. Acesso em 23 de julho 2014.

_____. **Lei nº 14.090 de 17 de julho de 2010**. Dispõe sobre a Política Estadual de Mudanças Climáticas. 2010. Disponível em: <http://www.semas.pe.gov.br/web/semas/legislacao>. Acesso em 23 de julho 2014.

_____. Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade (Semas). **Plano Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC)**. Pernambuco, PE, 2011. 65 p.

RAO, V. B.; LIMA, M. C. FRANCHITO, S. H. *Sesasonalandinterannualvariationsof rainfall over easternNortheastBrazil*. **J. Climate**, v.6, p.1754-1763. 1993.

RCLIMDEX 1.0 – **Manual delusuário**. Disponível em <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.shtml>. 2004.

ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. *Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillations*. **Rev. Mon. Wea**, v.115, p. 1606-1626, 1987.

ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. *Precipitation Patterns Associated with the High Index Phase of the Southern Oscillation*. **J Climate**, v. 2, p. 268-284, 1989.

SÁ, I. B., FOTIUS, G. A., RICÉ, G. R. Degradação ambiental e reabilitação natural no Trópico semi-árido brasileiro In: Conferência Nacional e Seminário Latino Americano da Desertificação, 1994, Fortaleza, CE. Anais... Brasília. DF: SEPLAN, 1994.

SARAVANAN, R.; CHANG, P. *Interaction between Tropical Atlantic variability and El Niño-southern oscillation*. **J Climate**, v.13, n.13, p. 2177-2194, 2000.

SALAT I, E. *et al.* **Tendências das Variações Climáticas para o Brasil no Século XX e Balanços Hídricos para Cenários Climáticos para o Século XXI**. Relatório 4, Ministério do Meio Ambiente (MMA), Secretaria de Biodiversidade e Florestas (SBF), Diretoria de Conservação da Biodiversidade (DCBio). Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade – Subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília, fevereiro, 2007.

SALATI, E.; SCHINDLER, W.; VICTORIA, D. C.; SOUZA, J. C. S.; VILLA NOVA, N. A. **Economicsofclimatechange in Brazil**: estimativas da oferta de recursos hídricos no Brasil em cenários futuros de clima (2015-2100), 89 p, 2009.

SALDIVA, P. H. N.; BRAGA, A. L. F. **Impactos das Mudanças Climáticas na Saúde Humana**. Faculdade 64 de Medicina da Universidade de São Paulo – FM/USP. Palestra proferida no seminário “Impactos das 65 Mudanças Climáticas e Cenários no Estado de São Paulo” realizado pela SMA/CETESB em junho de 2007. 66. São Paulo: 2007.

SANTOS, C. A.; BRITO, J. I. B. Análise dos índices de extremos para o semi-árido do Brasil e suas relações com TSM e IVDN. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 3, pp. 303-312, 2007.

SANTOS, C. A. C., BRITO, J. I. B., RAMANA RAO, T. V., MENEZES, H. E. A. Tendências dos índices de precipitação no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, p. 39-47, 2009.

SANTOS, C. A. C., MANZI, A.O. Eventos extremos de precipitação no estado do Ceará e suas relações com a temperatura dos oceanos tropicais. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 26, p. 36-48, 2011.

SANTOS, J.M. dos. Caracterização geoambiental do semi-árido. Texto técnico elaborado para documento do Grupo de Trabalho de Desertificação da Secretaria de Recursos Hídricos da

Bahia – Programa Estadual de combate à desertificação e mitigação dos efeitos da seca. Salvador, 2008.

SANTOS, J.M. Estratégias de convivência para a conservação dos recursos naturais e mitigação dos efeitos da desertificação no semiárido. In: Desertificação e Mudanças Climáticas no Semiárido Brasileiro. Editores: R. C. C. Lima, A. M. B. Cavalcante e A. M. P. Marin, Instituto Nacional do Semiárido - INSA, pp164-182, ISBN: 978-85-64265-02-8, 2011.

SELUCHI, M. E.; CHOU, S. C. *Evaluation of two Eta/CPTEC Model versions for weather forecast over South America. Geofísica Internacional*, v. 40, n 3 p. 219-237, 2001.

SERRA, A. B. *The general circulation over South America. Bull. of the Am. Meteorol. Soc.*, v.22, p.173-179, 1941.

SERVAIN, J. *Simple climatic indices for the tropical Atlantic Ocean and some applications. J. Geophys. Res.* v.96, n.C8, p.15,137-15,146, 1991.

SILVA, D. P.; MARENGO, J. A. **Águas atmosféricas. Águas Doces no Brasil - capital ecológico, usos múltiplos exploração racional e conservação.** Aldo da Cunha Rebouças, Benedito Braga Jr., José Galizia Tundisi, Eds. 2ns Ed. IEA/USP, pp. 65-116, 2002.

SILVA, V. P. R. *On climate variability in Northeast of Brazil. Journal of Arid Environments*, v.58, n.4, p.575-596, 2004.

SILLMANN, J.; KHARIN, V. V.; ZWIERS. F. W.; ZHANG, X.; BRONAUGH, D. (2013a) Climate extremes indices in the CMIP5 multi-model ensemble. Part 1: Model evaluation in the present climate. *J Geophys Res.*

SILLMANN, J.; KHARIN, V. V.; ZWIERS. F. W.; ZHANG, X.; BRONAUGH, D. (2013b) Climate extremes indices in the CMIP5 multi-model ensemble. Part 2: Future projections. *J Geophys Res.*

SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.B.; TIGNOR M.; MILLER, H. L. **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, 996 pp.35. 2007.

SOUZA FILHO, F. A. 2003. Variabilidade e mudanças de clima no semi-árido. *Clima e Recursos Hídricos*. Editores. C. Tucci e B. Braga. **Coleção ABRH** Vol. 9, Porto Alegre, RS, pp. 77-11.

SOUZA FILHO, F. A. *et al.* **Modelo de previsão de vazões sazonais e interanuais. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2003, Curitiba. Modelo De Previsão De Vazões Sazonais E Interanuais. Porto Alegre: ABRH. 2003.

SOUZA FILHO, F. A.; PORTO, R.L. Acoplamento de modelo climático e modelo **hidrológico. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2003, Curitiba. Desafios da Gestão da Água no Limiar do Século XXI. Porto Alegre: ABRH. 2003

SOUZA FILHO, F. A. *et al.* **Multi-decadal climate variability or change and reservoir performance: the Colorado River Compact**. In: 22nd Conference on Hydrology, 88th Annual American Meteorological Society, 2008, New Orleans. 88th Annual American Meteorological Society. New Orleans, LA: American Meteorological Society. 2008.

STERN, N. **Review on the Economics of Climate Change**. London: HM Treasury, 2006. Disponível em: <http://www.sternreview.org.uk>.

STERN, N. **The Economics of Climate Change: The Stern Review**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.

SUN, L.; SEMAZZI, F. H. M.; GIORGI, F.; OGALLO, L. *Application of the NCAR regional climate model to eastern Africa: 1-Simulation of the short rains of 1988*. **Journal of Geophysical Research**.104(D6), 6529-6548, 1999.

SUN, L.; MONCUNILL, D.; LI, H.; MOURA, A. D.; ASSIS F; ZEBIAK, S. E. *An Operational Dynamical Downscaling Prediction System for Nordeste Brazil and the 2002-04 Real-Time Forecast Evaluation*. **J. Climate**, 19(10), 1990-2007.

TEBALDI, C., HAYHOE, K., ARBLASTER, J., MEEHL, G., 2006: *Going to the extremes: an intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events*. No prelo, **Climatic Change**.

THORNTHWAITE, C. W. *An approach toward a rational classification of climate*. **Geogr.Rev**, v.38, p.55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W and MATHER, J. R. **The water balance**. *Publications in Climatology*. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104p, 1955.

TRENBERTH, K. E. *Development and forecast of the 1997-98 El Niño*. **CLIVAR scientific issues**. **CLIVAR-Exch**, v.3, p. 4-14, 1998.

TRENBERTH, K. E. *et al.* **Observations: Surface and Atmospheric Climate Change**. In: Solomon, S. D. *et al.* (Ed.) *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, United Kingdom, New York: Cambridge University Press, 2007.

TRÖGER, F. H. *et al.* Verificação da estacionariedade das séries anuais de vazões naturais das usinas hidrelétricas de três Marias e Sobradinho. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 11(4). 2006.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. *Environmental issues in the La Plata Basin*. **WaterResourcesDevelopment**, 14, 157-174. 1998

TUCCI, C. E. M. Variabilidade e mudanças de clima no semi-árido. *Clima e Recursos Hídricos*. Editores. C. Tucci e B. Braga. **Coleção ABRH** Vol. 9, Porto Alegre, RS, pp. 1-22. 2003.

TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: Problemas e soluções. **Estudos Avançados**, ISSN 0103-4014, v. 22 no. 63, São Paulo. 2008.

UVO, C. R. *et al.* *The relationship between tropical Pacific and Atlantic SST and northeast Brazil monthly precipitation*. **J. Climate**, v.11, p.551– 562, 1998.

VALVERDE, R. M. C.; MARENGO, J. A. **Desempenho dos modelos climáticos do IPCC em simular a precipitação presente e futura sobre o território brasileiro**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA - (CBMET), 14. Anais. Florianópolis: SBMET, 2006. 1 CD-ROM.

WAGNER, R. G. *Mechanisms controlling variability of the interhemispheric sea surface temperature gradient in the tropical Atlantic*. **J. Climate**, 9, p. 2010–2019, 1996.

WILBY, R. L.; WIGLEY, T. M. L. *Downscaling general circulation model output: A review of methods and limitations*. **Prog. Phys. Geogr.**, 21, 530-548, 1997.

WILBY, R. L.; WIGLEY, T. M. L.; CONWAY, D.; JONES, P. D.; HEWITSON, B. C.; MAIN, J.; WILKS, D. S. *Statistical downscaling of general circulation model output: a comparison of methods*. **WaterResourcesResearch**, Washington, v.34, n.11, p.2995-3008, 1998.

XAVIER, T. M. B. S. **Tempo de Chuva** - Estudos Climáticos e de Previsão para o Ceará e Nordeste Setentrional, Cap.3 e 6 / Cap.11, ABC Editora, Fortaleza-Ceará, 2001, 478 p.

XAVIER, T. M. B. S.; XAVIER, A. F. S.; SILVA-DIAS, M. A. F.; SILVA-DIAS, P. L. Inter-relações entre Eventos ENOS (ENSO), a ZCIT (ITCZ) no Atlântico e a Chuva nas Bacias Hidrográficas do Ceará. **Revista Brasileira Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 111-126. 2003.

ZHANG, X.; YANG, F. **RCLimDex (1.0) User Manual**, 23 p. 2004.

ZHAO, F. *et al.* Evaluation of methods for estimating the effects of vegetation change and climate variability on streamflow. **Water Resour. Res.**, **46** (W03505), doi:10.1029/2009WR007702.2010.

ANEXO 1 - GLOSSÁRIO

Fontes

Apêndice I do Climate Change, 2001: Working Group I: The Scientific Basis. IPCC 2001 (http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/); Apêndice II do Climate Change 2001: Working Group II: Impacts, Adaptation and Vulnerability. IPCC 2001. (http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/) Programa Nacional de Mudanças Climáticas. Ministério da Ciência e Tecnologia, Brasil. (<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/>)

Adaptação - ajustes nos sistemas natural ou humano em resposta ao atual ou esperado estímulo climático ou seus efeitos, que modera danos ou explora oportunidades benéficas.

Aerossóis - partículas em suspensão no ar. O termo também veio a ser associado, erroneamente, ao propulsor usado em aerossóis do tipo "spray".

Amplitude Térmica - a diferença entre a temperatura mínima e máxima durante um dia.

Antropogênico - resultante ou produzido por seres humanos.

Aridificação – de se tornar árido; secar.

Atribuição - veja: detecção e atribuição.

Avaliação de adaptação - a prática de identificar opções para a adaptação às mudanças de clima e avalia-las em termos dos critérios tais como disponibilidade, benefícios, custos, efetividade, eficiência e praticabilidade.

Cenário climático - uma representação plausível e frequentemente simplificada do clima futuro, baseada numa gama de relacionamentos climatológicos internamente consistentes, que foram construídos pelo uso explícito na investigação de consequências potenciais de mudança de clima antropogênica, geralmente servindo de introdução aos modelos de impacto. Projeções climáticas muitas vezes servem como um material inicial para construção de cenários climáticos, o que geralmente exigem informações adicionais, tais como o clima atual observado. Um cenário de mudança de clima é a diferença entre um cenário climático e o clima atual.

Cenário de emissão - uma representação plausível do desenvolvimento futuro de emissões de substâncias que são potencialmente radiativamente ativas (ex. Gases de efeito estufa, aerossóis), baseados numa gama de suposições coerentes e internamente consistentes sobre forças de direção (tais como desenvolvimento demográfico e socioeconômico, e mudança tecnológica) e seus relacionamentos mais importantes. Os cenários de concentração, derivados de emissão de cenários, são usados como uma introdução ao modelo climático para computar projeções climáticas.

Clima - clima num senso estreito é geralmente definido como a “média do tempo”, ou mais rigorosamente, como a descrição estatística em termos média e variabilidade de quantidades relevantes sobre o período de tempo numa distância de meses a milhares de anos. O período clássico é de 30 anos, como definido pela Organização Mundial Meteorológica (WMO). Estas quantidades são em sua maioria variáveis de superfícies tais como temperatura, precipitação e vento. Clima num senso mais amplo é um estado, incluindo uma descrição estatística, do sistema climático.

(Clima) Avaliação de impacto - a prática de identificar e avaliar as consequências benéficas e danosas à mudança de clima nos sistemas naturais e humanos.

(Clima) impactos - consequências da mudança de clima nos sistemas naturais e humanos. Dependendo da consideração de adaptação, pode ser distinguido entre os impactos potenciais e residuais.

Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima - (UNFCCC) - de 1992 faz parte de uma série de acordos recentes por meio dos quais países do mundo inteiro estão se unindo para enfrentar esse desafio. Outros acordos tratam de questões como a poluição dos oceanos, a degradação da terra, danos na camada de ozônio e a rápida extinção de espécies animais e vegetais. A Convenção sobre Mudança do Clima enfoca um problema especialmente inquietante: nós estamos mudando a forma com que a energia solar interage com a atmosfera e escapa dela. Fazendo isso, nós corremos o risco de alterar o clima global. Entre as consequências possíveis estão: um aumento na temperatura média da superfície da Terra e mudanças nos padrões climáticos mundiais. Outros efeitos, ainda imprevisíveis, não podem ser descartados.

Desmatamento - conversão da floresta em não floresta. Para uma discussão do termo floresta e termos relacionados tais como florestamento, reflorestamento, e desmatamento, veja o Relatório Especial do IPCC sobre o Uso da Terra, Mudança no Uso da Terra, e Área Florestal (IPCC, 2000).

Desertificação - degradação da terra em árido, semiárido e em áreas secas subsumidas resultantes de vários fatores, incluindo variações de clima de atividades humanas. Além disso, a UNCCD (A Convenção das Nações Unidas de Combate a Desertificação) define a degradação da terra como a redução ou perda de áreas em áridas, semiáridas, e áreas subsumidas, da produtividade e complexidade econômica de abastecimento de chuva das colheitas, safras irrigadas, ou extensão, pastagem, floresta, e matas resultantes do uso da terra ou de um processo ou combinação de processos, incluindo processos surgidos de atividades

humanas e padrões de habitação, tais como: (i) erosão do solo causada pelo vento e/ou pela água; (ii) deterioração das propriedades físicas, químicas e biológicas ou econômicas do solo; e (iii) grandes perdas da vegetação natural.

Detecção e atribuição - o clima varia continuamente em todas as escalas de tempo. A detecção da mudança de clima é o processo de demonstrar que o clima tem mudado em alguns sentidos estatísticos definidos, sem fornecer uma razão para tal mudança. A atribuição de causas de mudança de clima é o processo de estabelecer as causas mais prováveis para a mudança detectada com algum nível definido de confiança.

Dióxido de Carbono (CO₂) - gás de ocorrência natural, também um produto usado para queima de combustíveis fósseis e biomassa, tão bem como mudanças no uso da terra e outros processos industriais. É o principal gás antropogênico de efeito estufa que afeta o balanço da radiatividade da Terra. É o gás de referências contra outros gases que são medidos e por esta razão tem Aquecimento Global de 1.

Ecossistema - sistema distinto de interação de organismos vivos, juntamente com seu meio ambiente físico. Os limites que denominam ecossistema são um pouco arbitrários, dependendo do foco de interesse do estudo. Desta forma a extensão de um ecossistema pode variar de pequenas escalas espaciais até o tamanho da Terra toda.

Efeito Estufa - em longo prazo, a Terra deve irradiar energia para o espaço na mesma proporção em que a absorve do sol. A energia solar chega sob a forma de radiação de ondas curtas. Parte dessa radiação é refletida e repelida pela superfície terrestre e pela atmosfera. A maior parte dela, contudo, passa diretamente pela atmosfera para aquecer a superfície terrestre. A Terra se livra dessa energia, mandando-a de volta para o espaço, na forma de irradiação infravermelha de ondas longas. A maior parte da irradiação infravermelha que a Terra emite é absorvida pelo vapor d'água, pelo dióxido de carbono e outros "gases de efeito estufa" que existem naturalmente na atmosfera. Esses gases impedem que a energia passe diretamente da superfície terrestre para o espaço. Ao invés disso, processos interativos (como a radiação, as correntes de ar, a evaporação, a formação de nuvens e as chuvas) transportam essa energia para altas esferas da atmosfera. De lá, ela pode ser irradiada para o espaço. É bom que esse processo (chamado de efeito estufa) seja mais lento e indireto, porque se a superfície terrestre pudesse irradiar energia para o espaço livremente, nosso planeta seria um lugar frio e sem vida, tão desolado e estéril quanto Marte. Aumentando a capacidade da atmosfera de absorver irradiação infravermelha, nossas emissões de gases de efeito estufa estão perturbando a forma com que o clima mantém esse equilíbrio entre a energia que entra e

a energia que sai. Uma duplicação, na atmosfera, da quantidade de gases de efeito estufa de vida longa (projetada para acontecer logo no começo do século 21) reduziria em 2%, se nada fosse feito, a proporção em que o planeta é capaz de irradiar energia para o espaço. A energia não pode simplesmente acumular. O clima vai ter de se ajustar de alguma forma para se desfazer dessa energia excedente, e enquanto 2% parece não ser muito, tomando a Terra inteira, isso equivale a reter o conteúdo energético de 3 milhões de toneladas de petróleo por minuto.

El Niño - Oscilação Sul (ENSO) - em seu significado original, é o fluxo de aquecimento da água que periodicamente flui ao longo da costa do Equador e do Peru, rompendo a indústria de pesca local. Este evento oceânico está associado com a flutuação de um padrão e circulação da pressão da superfície intertropical nos oceanos Índico e Pacífico, chamado de Oscilação Sul. Este fenômeno da junção oceano-atmosfera é coletivamente conhecido como El Niño – Oscilação Sul, ou ENSO. Durante um evento El Niño, o transporte predominante dos ventos enfraquece e a contracorrente equatorial se fortalece, causando o aquecimento das águas na área da Indonésia e flui em direção ao leste e cobre as águas frias da corrente do Peru. Este evento tem grande impacto no vento, na temperatura da superfície do mar e nos padrões de precipitação no Pacífico tropical. Tem efeitos climáticos através da região do Pacífico e em muitas outras partes do mundo. O oposto de um evento El Niño é chamado de La Niña.

Evapotranspiração – o processo combinado de evaporação da superfície da Terra e de transpiração da vegetação.

Evento Extremo de Clima - é um evento que é raro dentro de sua distribuição de referência estatística num lugar em particular. Estas definições variam, mas um evento extremo de clima normalmente seria raro ou mais raro do que 10º ou 90º percentil. Por definição, as características do que é chamado evento extremo de clima podem variar de lugar para lugar. Um evento extremo de clima é uma média de um número de eventos do tempo sobre certo período, uma média que é extrema por si só (ex. chuva sobre a estação).

Forçamento radiativo – medida simples da importância de um mecanismo potencial de mudança do clima. O forçamento radiativo é a perturbação do balanço de energia do sistema Terra-atmosfera (em Wm^{-2}) em seguida, por exemplo, a uma mudança da concentração de dióxido de carbono ou uma mudança da radiação do Sol; o sistema climático responde a um forçamento radiativo de modo a restabelecer o balanço de energia. Um forçamento radiativo

positivo tende a aquecer a superfície e um forçamento radiativo negativo tende a esfriar a superfície.

Gás de efeito estufa - um gás que absorve radiação em comprimentos de ondas específicos dentro do espectro de radiação (radiação infravermelha) emitido pela superfície da Terra e pelas nuvens. O gás, por sua vez, emite radiação infravermelha de um nível onde a temperatura é mais baixa que a da superfície. O efeito líquido é um aprisionamento local de parte da energia absorvida e uma tendência a aquecer a superfície planetária. Vapor d'água (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) e ozônio (O₃) são os principais gases de efeito estufa na atmosfera da Terra.

Impactos potenciais – todos os impactos que ocorram dadas as mudanças projetadas no clima, sem considerar adaptação.

Incerteza - uma expressão do grau ao qual um valor (ex: o futuro estado do sistema climático) é desconhecido. Incerteza pode resultar de uma falha na informação ou de um desentendimento sobre o que se sabe ou mesmo do que se pode saber. Pode ter muitos tipos de fontes, de erros determináveis em detalhes de conceitos ou terminologia ambigualmente definidos, ou projeções incertas do comportamento humano. Incerteza pode consequentemente ser representada por medidas quantitativas (ex. Um limite de valores calculados por vários modelos) ou por declarações qualitativas.

Modelo climático - uma representação numérica do sistema de clima baseada nas propriedades físicas, químicas e biológicas de suas componentes, e seus processos de interação e regeneração, e conta para todos ou algumas de suas propriedades conhecidas. O sistema de clima pode ser representado pelos modelos de complexidade variada, por exemplo, para qualquer componente ou combinação de componentes, uma hierarquia de modelos pode ser identificada, diferenciando em tais aspectos como número de dimensões espaciais, a extensão aos quais os processos físicos, químicos ou biológicos são explicitamente representados, ou o nível aos quais as parametrizações empíricas estão envolvidas. Os modelos de Circulação Geral acoplados atmosfera/oceano/polar fornecem uma representação compreensiva do sistema de clima. Há uma evolução em direção aos modelos mais complexos com biologia e química ativas. Os modelos de clima são aplicados, como uma ferramenta de pesquisa, para estudar e simular o clima, mas também com propostas operacionais, incluindo previsões mensais, sazonais e interanuais.

Mudança do clima - uma mudança do clima atribuída direta ou indiretamente à atividade humana que altere a composição da atmosfera global e que seja adicional à variabilidade

climática natural observada ao longo de períodos comparáveis de tempo. A mudança do clima, como mencionada no registro observacional do clima, ocorre por causa de mudanças internas dentro do sistema climático, ou na interação de seus componentes, ou por causa de mudanças no forçamento externo por razões naturais ou devido às atividades humanas. Geralmente não é possível fazer uma atribuição clara entre essas causas. As projeções da mudança do clima no futuro relatadas pelo IPCC geralmente consideram apenas a influência sobre o clima dos aumentos antrópicos de gases de efeito estufa e outros fatores relacionados ao homem.

Previsão climática - uma previsão de clima é o resultado de uma tentativa de se produzir uma descrição mais similar ou estimada da evolução atual do clima no futuro. Por exemplo: escalas de tempo sazonais, interanuais ou de longo tempo. Veja também: Projeção Climática e Cenária de Clima (mudança).

Protocolo de Quioto - o Protocolo de Quioto para a Convenção de Estrutura das Nações Unidas em Mudanças de Clima (UNFCCC) foi adotado na Terceira Sessão da Conferência das Partes (COP), em 1997, em Quioto, Japão. Contém compromissos legalmente ligados, em acréscimo àqueles inclusos no UNFCCC. Os países incluídos no Anexo B do Protocolo (maioria países OECD e também aqueles com a economia em transição) concordaram em reduzir as emissões antropogênicas de gases do efeito estufa (CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, e SF₆) pelo menos em 5% abaixo dos níveis de 1990 no período de compromisso de 2008 à 2012. O Protocolo de Quioto não atingiu ainda seu objetivo (Abril 2001).

Regiões áridas - ecossistemas com menos de 250 mm precipitação por ano.

Regiões semiáridas - os ecossistemas que têm mais de 250 mm de precipitação por ano, mas não são altamente produtivos; geralmente classificados como terras distantes.

Seca - o fenômeno que ocorre quando a precipitação fica abaixo dos níveis normais registrados, causando sérios desequilíbrios que afetam adversamente os sistemas de produção de recursos da terra.

Simulação ou projeção do clima - uma projeção da resposta da emissão do sistema climático aos cenários de emissão ou concentração dos gases de efeito estufa e aerossóis, ou cenários de forçantes radiativas, frequentemente baseados nas simulações pelos modelos climáticos. Projeções de clima são diferentes de previsões climáticas, de maneira a enfatizar que as projeções de clima dependem do cenário utilizado de forçantes radiativas de emissão/concentração, que são baseados em suposições, a respeito, por exemplo, de

descobertas tecnológicas e socioeconômicas, que podem ou não serem realizadas, e consequentemente são assunto de uma incerteza substancial.

Sistema climático - o sistema climático é altamente complexo e consiste de cinco componentes principais: atmosfera, hidrosfera, criosfera, a superfície da terra e a biosfera, e suas interações. O sistema climático evolui em tempo sob influência de suas próprias dinâmicas internas e por causa das forçantes externas tais como erupções vulcânicas, variações solares e forçantes humanas induzidas tais como composição de mudança da atmosfera e mudança no uso da terra.

Variabilidade climática - variabilidade Climática se refere às variações no estado médio e outras estatísticas (tais como desvios padrão, a ocorrência de extremos, etc.) de um clima nas escalas temporais e espaciais além de eventos individuais de tempo. A variabilidade pode ser devido a processos internos naturais dentro do sistema climático (variabilidade interna), ou a variações nas forçantes antropogênicas externas (variabilidade externa). Ver também: Mudança de Clima.

Vulnerabilidade - o grau ao qual o sistema está suscetível, ou inapto para competir, efeitos adversos de mudança de clima, incluindo variabilidade climática e os extremos. A vulnerabilidade é a função da magnitude, qualidade, e índice da variação climática a qual um sistema está exposto, como também sua sensibilidade e capacidade de adaptação.