

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

GABRIELA LEITE NEVES

IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS NA DISPONIBILIDADE  
HÍDRICA DO SOLO NO ESTADO DO PARANÁ

PONTA GROSSA  
2015

GABRIELA LEITE NEVES

IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS NA DISPONIBILIDADE  
HÍDRICA DO SOLO NO ESTADO DO PARANÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual de Ponta Grossa, como requisito para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Jorim Sousa das Virgens Filho

PONTA GROSSA  
2015

**Ficha Catalográfica**  
**Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG**

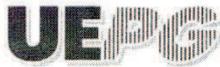
Neves, Gabriela Leite  
N511 Impacto das mudanças climáticas globais na disponibilidade hídrica do solo no estado do Paraná/ Gabriela Leite Neves. Ponta Grossa, 2015.  
91f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental - Área de Concentração: Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Jorim Sousa das Virgens Filho.

1.Mudanças climáticas. 2.Geração de dados climáticos. 3.Balanço hídrico. 4.Disponibilidade hídrica. I.Virgens Filho, Jorim Sousa das. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental. III. T.

CDD: 551.6



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL  
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE



## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: **“Impacto das mudanças climáticas globais na disponibilidade hídrica do solo no estado do Paraná”**

Nome: **Gabriela Leite Neves**

Orientador: **Prof. Dr. Jorim Sousa das Virgens Filho**

Aprovado pela Comissão Examinadora:

**Prof. Dr. Jorim Sousa das Virgens Filho**  
Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG

**Prof. Dr. Paulo Henrique Caramori**  
Instituto Agrônômico do Paraná - IAPAR

**Prof. Dr. Paulo Costa de Oliveira Filho**  
Universidade Estadual do Centro-Oeste - UNICENTRO

Ponta Grossa, 09 de fevereiro de 2015.

À minha família que sempre me orienta a seguir pelos  
melhores caminhos.  
Dedico

## AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual de Ponta Grossa, à coordenação e a todos os professores do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de pesquisa.

Ao Professor e orientador Jorim Sousa das Virgens Filho pela confiança e dedicação na orientação deste trabalho, pela grande contribuição com seus conhecimentos e também pelo constante apoio e incentivo ao meu crescimento científico.

A professora Maysa de Lima Leite pelas sugestões e contribuições nos trabalhos e pela dedicação.

Ao IAPAR pela concessão dos dados meteorológicos.

Aos colegas de turma por compartilharem as atividades do curso.

A Eliane Nascimento dos Santos e Joel Zubek pelas contribuições, sugestões e ajuda com as ferramentas de geoprocessamento utilizadas neste trabalho.

A Elisana Milan, pelo auxílio e pelas sugestões na elaboração dos mapas e principalmente pela amizade e companheirismo.

Aos meus amigos Mariana, Leilane, Paulo e outros, pelo apoio de sempre e pelos momentos de descontração e alegria.

Aos meus pais Cidinha Gomes Leite Neves e Mozart Linhares Neves pelo exemplo de vida e por me ensinarem os verdadeiros valores da vida. Ao meu irmão Mozart Gabriel por dividir todos os momentos durante a realização do curso e a minha irmã Isabela Leite Neves e ao meu sobrinho Augusto Serrano pelo carinho e amor.

A toda minha família, tios, primas, Tia Lauriane, Tia Magda e principalmente à minha avó Rosecler Gomes pelo suporte e apoio de sempre.

Ao meu namorado Gustavo Beruski, pelo amor, companheirismo, e compreensão durante a realização do curso e também por me ajudar com seus conhecimentos na área de agrometeorologia.

A todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento dessa dissertação.

A DEUS, que cuida de todos os meus passos, e me guia pelos melhores caminhos.

“Procure ser uma pessoa de valor,  
em vez de procurar ser uma pessoa de sucesso.

O sucesso é consequência”

(Albert Einstein)

## RESUMO

As modificações do clima é assunto de pesquisa, já que ainda existem muitos questionamentos sobre suas causas e consequências. Os efeitos das mudanças climáticas são diversos, e podem atingir desde a biodiversidade do planeta até os setores econômicos, sociais e ambientais. Sendo assim o conhecimento das variáveis climáticas, de suas alterações e seus impactos nos recursos naturais é de suma importância. Muitos pesquisadores já observaram que a água, um recurso natural de grande valor, poderá sofrer perturbações decorrentes das mudanças climáticas. Assim o estudo da disponibilidade hídrica frente às mudanças climáticas se torna necessário. O objetivo desse trabalho foi analisar o impacto de possíveis mudanças climáticas na disponibilidade hídrica no estado do Paraná. Utilizou-se dados diários de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima de 28 localidades, que correspondem a uma série de dados de 1980 a 2009. Por meio da ferramenta PGECLIMA\_R, realizaram-se simulações de dados climáticos diários, para o período de 2010 até 2099, considerando os cenários climáticos projetados no IPCC-AR4, IPCC-AR5 e na análise de tendência dos dados históricos no período de 1980 a 2009. Para a criação deste último cenário, realizou-se um estudo paralelo em que se obteve as alterações na temperatura para cada localidade, as quais foram então projetadas nas simulações. A fim de quantificar a disponibilidade hídrica nas condições propostas, estimou-se os balanço hídricos para os dados climáticos atuais e para os simulados, pela metodologia de Thornthwaite e Matter (1955). Com ferramentas de interpolação, os valores das alterações na temperatura e dos índices hídricos obtidos pelo balanço hídrico foram espacializados para todo o estado do Paraná. Os índices hídricos então foram comparados nos diferentes cenários e períodos analisados. Os resultados apontam que o estado do Paraná apresenta uma grande variabilidade climática entre suas regiões. A análise de tendência da temperatura do ar apontou desde reduções a aumentos nessa variável e essas alterações foram responsáveis também por diferentes impactos na disponibilidade hídrica. De forma geral, todos os cenários foram responsáveis por reduções na disponibilidade hídrica, porém a região norte foi aquela que mostrou ser mais suscetível a essas reduções. O cenário de tendência apontou reduções na disponibilidade hídrica para a maioria das regiões, porém houve aumento pontual da mesma em algumas regiões específicas do Estado do Paraná.

**Palavras-chave:** Mudanças climáticas. Geração de dados climáticos. Balanço hídrico. Disponibilidade hídrica.

## ABSTRACT

Climate change is a matter of research, since there are still many questions about its causes and consequences. The effects of climate change are diverse, and can reach from the biodiversity of the planet to the economic, social and environmental sectors. Thus the knowledge of climate variables, their changes and impacts on natural resources is very important. Many researchers already had observed that water, a natural resource of great value, may be disturbed due to climate change. Thus the study of water availability related to climate change becomes necessary. The aim of this study was to analyze the impact of possible climate changes on water availability in the state of Paraná, Brazil. It were used daily data of precipitation, and maximum and minimum air temperature of 28 locations, with series of data from 1980 to 2009. By means of the PGECLIMA\_R tool daily weather data were simulated for the period 2010 to 2099, using the climate scenarios projected in the IPCC AR4-, IPCC AR5- and trend analysis of historical data from 1980 to 2009. For the creation of the latter scenario, there was a parallel study to obtain the changes in temperature for each location, which were then projected in the simulations. In order to quantify the water availability under the proposed conditions, we estimated the water balance for the current and simulated weather data using the methodology of Thornthwaite and Matter (1955). With interpolation tools, the results of changes in temperature and hydric indices obtained by the water balance were mapped for the entire state of Paraná. The hydric indices were then compared in different scenarios and analyzed periods. The results show that the state of Paraná has a great climate variability across regions. The trend analysis of air temperature pointed from reductions to increases in this variable and these were responsible for different impacts on water availability. In general, all scenarios were responsible for reductions in water availability, but the northern region is more susceptible to these reductions. The trend scenario showed reductions in water availability for most regions, but there was also increase in some specific regions of Parana State.

**Keywords:** Climate change. Weather generator. Water balance. Water availability.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### CAPÍTULO I

Figura 1.1-	Cartograma de localização de Ponta Grossa-PR.	34
Figura 1.2-	Relação entre a evapotranspiração potencial estimada pela metodologia de Thornthwaite (1948) e a temperatura média do ar, durante o período compreendido entre 1980 e 2009 no município de Ponta Grossa, PR.....	39
Figura 1.3-	Extrato do balanço hídrico para o período simulado de 2010 a 2039 com aumento de 4,0°C na temperatura (C1), para o município de Ponta Grossa, PR.....	41
Figura 1.4-	Extrato do balanço hídrico para o período simulado de 2010 a 2039 com aumento de 1,8°C na temperatura (C2), para o município de Ponta Grossa, PR.....	42
Figura 1.5-	Extrato do balanço hídrico para o período simulado de 2040 a 2069, com aumento de 4,0°C na temperatura (C1), para o município de Ponta Grossa, PR.....	43
Figura 1.6-	Extrato do balanço hídrico para o período simulado de 2040 a 2069 com aumento de 1,8°C na temperatura (C2), para o município de Ponta Grossa, PR.....	43
Figura 1.7-	Extrato do balanço hídrico para o período simulado de 2070 a 2099, com aumento de 4,0°C na temperatura (C1), para o município de Ponta Grossa, PR.....	44
Figura 1.8-	Extrato do balanço hídrico para o período simulado de 2070 a 2099 com aumento de 1,8°C na temperatura (C2), para o município de Ponta Grossa, PR.....	45

## **CAPÍTULO II**

Figura 2.1-	Localidades e estações meteorológicas do IAPAR distribuídas no estado do Paraná	51
Figura 2.2-	Mapa do estado do Paraná representando as alterações de temperatura mínima (°C/ano).	60
Figura 2.3-	Mapa do estado do Paraná representando as alterações de temperatura máxima (°C/ano).	61

## **CAPÍTULO III**

Figura 3.1-	Regiões e localidades distribuídas no estado do Paraná.	69
Figura 3.2-	Valores de I <sub>h</sub> interpolados para o ano de 2039 em três cenários climáticos simulados (1.7°C, 4.8°C e Tendência).	74
Figura 3.3-	Valores de I <sub>h</sub> interpolados para o ano de 2069 em três cenários climáticos simulados (1.7°C, 4.8°C e Tendência).	76
Figura 3.4-	Valores de I <sub>h</sub> interpolados para o ano de 2099 em três cenários climáticos simulados (1.7°C, 4.8°C e Tendência).	77

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO I

Tabela 1.1-	Valores médios mensais de temperatura máxima e mínima do ar e totais mensais médios de precipitação registrados no município de Ponta Grossa, PR, no período de 1980 e 2009.....	37
Tabela 1.2-	Estimativa da evapotranspiração potencial no município de Ponta Grossa, PR, no período de 1980 e 2009.....	38
Tabela 1.3-	Estimativa do balanço hídrico referente ao período de 1980 a 2009 para CAD=75,0 mm.....	40

### CAPÍTULO II

Tabela 2.1-	Valores dos coeficientes angulares de regressão para cada localidade e estação do ano das variáveis temperatura máxima e temperatura mínima.	55
Tabela 2.2-	Teste de Mann-Kendall para a variável temperatura máxima para as localidades e estações do ano.	57
Tabela 2.3-	Teste de Mann-Kendall para a variável temperatura mínima para as localidades e estações do ano.	59

## LISTA DE SIGLAS

AC	Ascensão capilar
ALT	Alteração de água no solo
ANA	Agência Nacional de Águas
ARM	Armazenamento de água no solo
BH	Balanço Hídrico
BHC	Balanço Hídrico Climatológico
CAD	Capacidade de água disponível
DEF	Deficiência Hídrica ou Déficit Hídrico
DLi	Escorrimento sub-superficial
DLo	Escoamento sub-superficial
DP	Drenagem Profunda
ET	Evapotranspiração
ETP	Evapotranspiração Potencial
ETp	Evapotranspiração potencial padrão
ETR	Evapotranspiração Real
EXC	Excesso Hídrico ou Excedente hídrico
GCMs	Modelos climáticos globais ou modelos de circulação global
Ia	Índice de aridez
IAPAR	Instituto Agrônomo do Paraná
Ih	Índice hídrico
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas)
Iu	Índice de umidade
LAMA	Laboratório de Mecanização Agrícola
LECA	Laboratório de Estatística Computacional e Aplicada
NAc	Negativo Acumulado
O	Orvalho
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PREC	Precipitação Pluvial
RCP	Representative Concentration Pathways (Vias de Concentração Representativa)
Ri	Escorrimento superficial
Ro	Escoamento superficial
SIG	Sistema de informações geográficas
TMAX	Temperatura Máxima
TMED	Temperatura Média
TMIN	Temperatura Mínima
UEPG	Universidade Estadual de Ponta Grossa

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	14
REVISÃO GERAL.....	16
1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS .....	16
2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO .....	19
3 BALANÇO HÍDRICO .....	21
4 CONSEQUÊNCIAS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA.....	24
5 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL .....	26
CAPÍTULO I.....	28
DISPONIBILIDADE HÍDRICA DO SOLO EM PONTA GROSSA-PR, BRASIL, A PARTIR DA SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS CLIMÁTICOS IMPACTADOS POR MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS .....	28
RESUMO .....	28
ABSTRACT .....	29
1 INTRODUÇÃO .....	30
2 MATERIAIS E MÉTODOS .....	33
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	36
4 CONCLUSÃO .....	46
CAPÍTULO II.....	47
ANÁLISE TEMPORAL E ESPACIAL DA TEMPERATURA DO AR NO ESTADO DO PARANÁ, BRASIL.....	47
RESUMO .....	47
ABSTRACT .....	48
1 INTRODUÇÃO .....	49
2 MATERIAIS E MÉTODOS .....	50
3 RESULTADOS.....	53
4 CONCLUSÕES .....	61
CAPÍTULO III.....	63
SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS E O IMPACTO NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA DO ESTADO DO PARANÁ.....	63
RESUMO .....	63
ABSTRACT .....	64

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>65</b>
<b>2 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>68</b>
<b>3 RESULTADOS.....</b>	<b>71</b>
3.1 BALANÇO HÍDRICO PARA O PERÍODO DE 1980 A 2009 .....	73
3.2 PERÍODO DE 2039 .....	73
3.3 PERÍODO DE 2069 .....	75
3.4 PERÍODO DE 2099 .....	77
<b>4 CONCLUSÃO .....</b>	<b>79</b>
<b>CONCLUSÕES FINAIS.....</b>	<b>81</b>
<b>REFERÊNCIAS GERAIS .....</b>	<b>83</b>

## INTRODUÇÃO GERAL

A água é um elemento essencial à manutenção da vida e por isso é considerada um recurso natural muito importante para o desenvolvimento social e ambiental e, também para a maioria dos setores econômicos de uma região. Porém, os múltiplos usos dos recursos hídricos, o aumento populacional e o processo de urbanização são fatores que estão sendo observados como responsáveis pelo constante aumento da demanda hídrica e por alterações da quantidade e da qualidade desse recurso natural (TUNDISI, 2003). Assim, esses fatores ou qualquer outro que possa causar impacto na disponibilidade hídrica, devem ser observados e considerados no planejamento e gestão dos recursos hídricos.

A determinação da quantidade de água é fundamental para o manejo dos recursos hídricos e também para o correto planejamento de um sistema de irrigação, uma vez que a agricultura irrigada é uma das atividades econômicas que mais consomem água, devido à necessidade no processo metabólico das plantas, que dependem diretamente da quantidade de água disponível no solo (PIRES et al., 2008).

Uma maneira de determinar a quantidade de água do solo é por meio da estimativa do balanço hídrico, que permite quantificar as entradas e as saídas de água do solo. A precipitação pluvial representa o principal componente de entrada, enquanto a evapotranspiração, que é a perda conjunta da água para a atmosfera pelos processos de evaporação e transpiração das plantas, é o principal componente de saída de água do sistema hídrico. Portanto, o balanço hídrico depende diretamente das condições climáticas, e quaisquer alterações nas variáveis temperatura do ar ou precipitação pluvial, pode ser responsável pela modificação no balanço hídrico.

Dentro deste contexto, as mudanças climáticas, assunto atual de preocupação da sociedade em geral, estão sendo responsáveis por provocar impactos na disponibilidade hídrica regional. Segundo Silva; Nóbrega e Galvíncio (2009) estas variabilidades climáticas, principalmente modificações na temperatura e precipitação, poderão acarretar em alterações nos recursos hídricos, afetando o abastecimento humano, geração de energia e agricultura.

O IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernmental de Mudanças Climáticas), estabelecido, em 1988, pela

Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), foi criado para avaliar a variabilidade do clima e seus possíveis riscos a sociedade, e fornecer informações técnicas e socioeconômicas sobre as mudanças climáticas. O IPCC sugere algumas projeções de alterações nas variáveis climáticas que são consideradas na simulação dos cenários climáticos globais. No entanto, com o intuito de analisar as alterações climáticas em nível local, podem ser consideradas também as tendências dos dados históricos regionais.

De acordo com Souza e Azevedo (2009), o conhecimento das variações das temperaturas máximas e mínimas do ar em nível local é de suma importância, pois estas séries climatológicas locais precisam ser avaliadas com muita atenção. Para localidades que não possuem dados climáticos, muitas pesquisas utilizam-se de ferramentas de geoprocessamento como a interpolação, que permite estimar valores para essas regiões e realizar uma análise espacial. Com o objetivo de avaliar esses impactos das mudanças climáticas, muitos pesquisadores utilizam geradores estocásticos do clima, os quais geram séries climáticas estatisticamente semelhantes aos dados históricos, com o intuito de disponibilizar informações extrapoladas acerca do clima local. Para a criação de cenários futuros, os resultados gerados por modelos climáticos globais (GCMs) são utilizados como projeções representando a alteração na variável temperatura.

O estado do Paraná tem a agricultura como um dos pilares da sua economia. O estudo do balanço hídrico do solo frente aos futuros cenários de mudança climática permite identificar se a região apresentará futuramente deficiência ou excesso de água no solo, podendo assim auxiliar no planejamento do agronegócio e na gestão e manejo integrado em longo prazo dos recursos hídricos do estado.

Sendo assim, este trabalho teve como objetivo geral, avaliar os possíveis impactos das mudanças climáticas globais na disponibilidade hídrica do solo no estado do Paraná, Brasil, por meio de simulação computacional.

Com o intuito de atingir o objetivo geral do trabalho foram elaborados três artigos que serão apresentados em formato de capítulos. O primeiro capítulo refere-se ao primeiro artigo que teve como objetivo avaliar a disponibilidade hídrica do solo do Município de Ponta Grossa - PR frente aos cenários climáticos futuros. Este primeiro artigo pode ser considerado como um trabalho piloto, onde se pôde testar e

avaliar as metodologias do trabalho como um todo. Neste trabalho foram considerados dois cenários projetados pelo quarto relatório do IPCC (IPCC, 2007), um aumento de 1.8°C e um aumento de 4.0°C na temperatura do ar. A fim de obter o cenário segundo a tendência dos dados históricos, realizou-se o segundo artigo (capítulo 2) que teve como objetivo avaliar a tendência temporal e espacial da temperatura máxima e mínima do ar do estado do Paraná. Este cenário seguindo a tendência regional em conjunto com os cenários projetados no quinto relatório do IPCC (IPCC, 2013), o qual foi publicado no decorrer da pesquisa, foram utilizados no terceiro artigo (capítulo 3) que teve como objetivo avaliar o impacto das alterações climáticas na disponibilidade hídrica no estado do Paraná.

## **REVISÃO GERAL**

### **1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Modificações na superfície terrestre, como aumento nas temperaturas do ar, derretimento das calotas polares, aumento do nível do mar, entre outras, se tornaram foco de estudo para muitos pesquisadores. Os processos naturais da Terra sempre foram responsáveis pelas mudanças no clima (NOBRE et al., 2011) e conseqüentemente na superfície terrestre. Porém, essas instabilidades estão sendo observadas como não naturais e, no entanto, estão relacionadas ao aquecimento global e às mudanças climáticas, temas que têm sido assunto de preocupação da população em geral, já que ainda existem muitas dúvidas relacionadas às suas causas e conseqüências.

Os conceitos de mudanças climáticas e aquecimento global são muitas vezes confundidos com o efeito estufa. Segundo Medeiros (2003), o efeito estufa é fenômeno natural causado pela presença de gases na atmosfera que são responsáveis pelo aquecimento da superfície terrestre. Esta por sua vez absorve radiação solar e emite radiação térmica para o espaço, criando assim um balanço radioativo que pode ser afetado por qualquer perturbação. Um aumento na concentração dos gases atmosféricos tende a intensificação do aquecimento da baixa atmosfera, o que provoca alterações no comportamento do clima. A elevação das temperaturas da atmosfera terrestre é genericamente chamada de aquecimento

global e está associada às atividades humanas que emitem gases de efeito estufa, como industrialização, queima de combustíveis fósseis, desmatamento e as mudanças no uso da terra (IPCC, 2007). De acordo com a síntese do quarto relatório do IPCC (IPCC, 2007) o termo mudanças climáticas pode ser definido como qualquer mudança no clima ao longo do tempo, oriunda de uma variabilidade natural ou como resultado da atividade humana.

O IPCC utiliza de modelos de circulação global (GCMs) como ferramentas para projetar cenários futuros com base nas emissões dos gases de efeito estufa em conjunto com fatores como demografia, desenvolvimento socioeconômico, e mudança na tecnologia (IPCC, 2001).

O quarto relatório científico do IPCC publicado em 2007 (IPCC, 2007), propôs quatro cenários de mudanças climáticas, que foram classificados em: A1, A2, B1 E B2. Neste relatório é sugerido, como melhor estimativa, um aumento de  $1,8^{\circ}\text{C}$  na temperatura média global, representando o cenário B1 que descreve uma rápida mudança na estrutura econômica mundial, com uma introdução de tecnologias limpas. Considera-se para a criação deste cenário a sustentabilidade ambiental e social. Já para o pior cenário sugere um acréscimo de  $4,0^{\circ}\text{C}$ , representando o cenário A1F1, onde A1 representa um mundo futuro em que a globalização é dominante, com crescimento econômico rápido, crescimento populacional pequeno e desenvolvimento de tecnologias mais eficientes. A convergência econômica e cultural, com uma redução significativa em diferenças regionais e renda per capita são consideradas neste cenário. O cenário A1F1 considera o máximo uso de combustível fóssil.

O quinto relatório do IPCC publicado em 2013 (IPCC, 2013) também utilizou de quatro diferentes cenários, chamados de RCPs - Representative Concentration Pathways (Vias de Concentração Representativa).

Porém, além da quantidade de emissão de gases, este relatório também considerou o quanto será o impacto dessas emissões na alteração do balanço de radiação do sistema terrestre. Assim, avalia a quantidade de energia solar que ficou armazenada no planeta de acordo com a concentração de gases do efeito estufa. A alteração no balanço de energia é definida como forçamento radiativo, que é medido em  $\text{watts/m}^2/\text{período}$ . Sendo assim cada cenário leva em conta um forçamento radiativo em conjunto com a emissão de gases: (1) RCP 8.5, onde o forçamento radiativo é maior do que  $8,5 \text{ Wm}^{-2}$  e a concentração de  $\text{CO}_2$  equivalente maior do

que 1.370 ppm.; (2) RCP 6.0, onde o forçamento radiativo será de cerca de  $6 \text{ Wm}^{-2}$  e a concentração de CO<sub>2</sub> equivalente em torno de 650 ppm.; (3) RCP 4.5, onde o forçamento radiativo será aproximadamente de  $4,5 \text{ Wm}^{-2}$  e a concentração de CO<sub>2</sub> equivalente girará em torno de 650 ppm; e (4) RCP 2.6, onde o forçamento radiativo ficará em torno de  $3 \text{ Wm}^{-2}$  e a concentração de CO<sub>2</sub> equivalente atingirá um pico de cerca de 490 ppm antes de 2100 e então declinará (MOSS et al., 2010).

As projeções sugeridas nesse relatório estão nas faixas de 0,3°C a 1,7°C (RCP2.6), 1,1°C a 2,6°C (RCP4.5), 1,4°C a 3,1°C (RCP6.0) ou 2,6°C a 4,8°C (RCP8.5). Essas alterações são globais, porém há a necessidade em avaliar as alterações na temperatura em nível local.

A alteração na temperatura em nível local pode estar relacionada às mudanças climáticas globais ou às alterações regionais. Podem também ser causadas por ações antrópicas, como a emissão exagerada de gases do efeito estufa ou por mudanças no uso do solo. Ainda pode ser consequência de causas naturais decorrentes do efeito da maritimidade. Com o objetivo de avaliar as futuras mudanças climáticas e suas conseqüências em nível local, pesquisas utilizam geradores estocásticos do clima, que segundo Semenov (2008), são modelos capazes de gerar padrões meteorológicos diários estatisticamente semelhante aos padrões dos dados históricos. Esses geradores são usualmente utilizados como ferramentas eficientes na simulação de cenários climáticos futuros para avaliação de modelos agrônômicos ou hidrológicos, pois permitem mudar os cenários com base na saída de modelos climáticos globais, tendo em vista as possíveis mudanças climáticas. Assim, vários pesquisadores têm proposto geradores estocásticos de séries climáticas, o CLIGEN (NICKS; HARP, 1980), o WGEN ( RICHARDSON; WRIGHT, 1984), o LARS-WG (SEMENOV; BARROW, 1997), sendo que no Brasil destacam-se o GEPAC (VIRGENS FILHO, 1997), o SEDAC\_R (VIRGENS FILHO, 2001), o CLIMABR (OLIVEIRA; ZANETTI; RUSKI, 2005) e mais recentemente o PGECLIMA\_R (VIRGENS FILHO et al., 2013).

A ferramenta PGECLIMA\_R - Gerador Estocástico de Cenários Climáticos proposta em Virgens Filho e Leite (2013), pode ser considerada uma evolução do SEDAC\_R – Simulador Estocástico de Dados Climáticos, proposto por Virgens Filho (2001), pois além de simular dados climáticos, permite a criação de cenários climáticos futuros. Na simulação dos dados, o PGECLIMA\_R utiliza a distribuição normal para gerar os dados diários de temperatura do ar (tanto para a temperatura

mínima como para a máxima) e, para os dados de precipitação utiliza a distribuição gama. Antes da simulação da temperatura do ar, é analisada a ocorrência de precipitação pluvial por processos estocásticos, assim a simulação é realizada independentemente para dias chuvosos e dias secos, visto que a distribuição dos valores para a temperatura máxima e mínima diferem para os dois casos. Em Virgens Filho e Leite (2010) a ferramenta foi aplicada com o objetivo de simular cenários climáticos para região fitogeográfica dos Campos Gerais – PR. A simulação foi baseada na projeção climática segundo o terceiro relatório de avaliação do IPCC (IPCC, 2001).

## **2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO**

A influência das variáveis do clima na disponibilidade hídrica pode ser entendida pelo fato de que a elevação da temperatura pode aumentar a capacidade do ar em reter vapor d'água, o que aumenta a demanda para evapotranspiração (ET) das plantas.

A ET compreende a perda conjunta da água para atmosfera pelos processos de evaporação da água, do solo e da vegetação úmida e da transpiração das plantas. Pode ser definida, dependendo das condições locais, como Evapotranspiração Potencial (ETP) e Evapotranspiração Real (ETR).

A ETP representa a quantidade máxima de água perdida pelo conjunto evaporação e transpiração de uma extensa superfície vegetal rasteira em crescimento ativo, que se encontra em condições ideais hídricas de temperatura e demais parâmetros meteorológicos locais. Já o total de água utilizada por essa superfície, com ou sem restrição hídrica, é representado pela ETR (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007).

Sua medida é de difícil obtenção, sendo assim, a ET pode ser estimada por meio de equações desenvolvidas em função das variáveis climatológicas que podem ser medidas em estações meteorológicas. Entre os métodos existentes, o Método Thornthwaite (1948) é bastante utilizado por apresentar grande praticidade e por utilizar apenas a temperatura média do ar (CAMARGO; CAMARGO, 2000). Segundo os mesmos autores este modelo funciona adequadamente em regiões de clima úmido, independentemente da latitude e altitude.

Este modelo tem como variáveis de entrada apenas a temperatura média do ar e as coordenadas geográficas do local, fato que justifica a escolha dessa metodologia.

Primeiramente calcula-se a evapotranspiração potencial padrão (ETp) (mm mês) pela seguinte equação:

$$ETp = 16 (10 Tn / I)^a \quad 0 \leq Tn \leq 26,0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

onde:

$Tn$  = temperatura média do mês  $n$ , em  $^\circ\text{C}$ ;

$I$  = índice que expressa o nível de calor disponível na região, calculado pela equação:

$$I = \sum_{n=1}^{12} (0,2 Tn)^{1,514} \quad (2)$$

$a$  = índice térmico regional, calculado pela função polinomial:

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

O valor de ETp calculado representa o total mensal de evapotranspiração que ocorreria naquelas condições térmicas, mas para um mês padrão de 30 dias, em que cada dia teria 12 horas de fotoperíodo (Thorntwaite, 1948). Portanto, para se obter a ETP do mês correspondente, esse valor de ETp deve ser corrigido em função do número real de dias e do fotoperíodo do mês, ou seja:

$$ETP = ETp \text{ Cor} \quad (4)$$

$$\text{Cor} = (ND/30)(N/12) \quad (5)$$

Onde: ND é o número de dias do mês em questão, e N é o fotoperíodo médio daquele mês.

Entende-se por fotoperíodo (N) o intervalo entre o nascer e o pôr do Sol num dado dia, também denominado de duração do dia, ou seja,

$$N = \text{Hora do Pôr do Sol} - \text{Hora do Nascer.} \quad (6)$$

Para caracterização do regime hídrico do estado do Paraná, também foram calculados os índices climáticos de aridez ( $I_a$ ), de umidade ( $I_u$ ) e hídrico ( $I_h$ ), segundo Thornthwaite (1948).

O índice de aridez caracteriza-se por indicar a escassez hídrica expressa em percentagem em função da deficiência hídrica (DEF) e da evapotranspiração potencial (ETP), ambas anuais, estimado por meio de:

$$I_a = 100 . ( DEF / ETP ) \quad (7)$$

O índice de umidade representa o excedente hídrico expresso em percentagem em função do excesso hídrico (EXC) e da evapotranspiração potencial (ETP), ambos anuais, e estimado segundo a expressão:

$$I_u = 100 . ( EXC / ETP ) \quad (8)$$

Tendo em vista que ao longo do ano ocorrem períodos de excesso e falta de água, define-se o índice hídrico como sendo:

$$I_h = I_u - 0,6 . I_a \quad (9)$$

### 3 BALANÇO HÍDRICO

A estimativa da evapotranspiração, assim como do balanço hídrico do solo (BH), permite o diagnóstico da quantidade e freqüência de água utilizada nas irrigações o que se torna essencial ao manejo sustentável dos recursos hídricos (SILVA et al., 2012).

Uma maneira de determinar a quantidade de água necessária para o desenvolvimento de uma cultura agrícola, ou seja, quantificar a água do solo é por meio da estimativa do balanço hídrico que permite quantificar as entradas e as

saídas do sistema solo. As entradas são representadas pela precipitação pluvial (PREC), orvalho (O), escoamento superficial (Ri), escoamento sub-superficial (DLi) e ascensão capilar (AC) e as saídas representadas pela evapotranspiração (ET), escoamento superficial (Ro), escoamento sub-superficial (DLo) e drenagem profunda (DP) (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007). Segundo os mesmos autores o principal componente de entrada em um sistema hídrico é representado pela PREC. A contribuição do O é considerada desprezível, uma vez que só assume importância em regiões muito áridas. O mesmo ocorre para entrada de água através da AC, que por ser muito pequena e somente ocorrer em locais com lençol freático superficial e em períodos muito secos, também é considerada desprezível. Os fluxos horizontais de água (Ri, Ro, DLi e DLo) para áreas homogêneas, se compensam e portanto anulam-se. A ET é o principal componente de saída, especialmente nos períodos secos, ao passo que DP constitui-se em outro meio de saída de água e é responsável pelo controle do volume de água no solo nos períodos excessivamente chuvosos.

Sendo assim, o balanço hídrico resulta na seguinte equação:

$$\Delta ARM = PREC - ET - DP \quad (10)$$

Por meio dessa equação, pode-se determinar a variação da disponibilidade de água no solo e caso se conheça a capacidade de água disponível (CAD) desse solo, pode-se determinar também a quantidade de água armazenada por ele.

O balanço hídrico climatológico (BHC) proposto por Thornthwaite e Mather (1955) é uma das maneiras de contabilizar o balanço de água do solo. A partir dos dados de PREC, de evapotranspiração potencial (ETP) e da capacidade de água disponível (CAD), chega-se aos valores de disponibilidade de água no solo (Armazenamento = ARM), de alteração do armazenamento de água do solo (ALT =  $\Delta ARM$ ), de evapotranspiração real (ETR), de deficiência hídrica (DEF) e de excedente hídrico (EXC = DP).

A escolha do método de estimativa de BHC deve-se a disponibilidade dos dados climáticos e por ter sido desenvolvido para regiões de clima úmido (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007).

Os parâmetros do BHC calculados, são evapotranspiração real (ETR), armazenamento de água no solo (ARM), negativo acumulado (NAC) alteração de água no solo (ALT), deficiência hídrica no solo (DEF) e excedente hídrico (EXC), sendo que já se conhece PREC, ETP e CAD.

Como primeiro passo calcula-se (PREC-ETP). Para determinação do NAc e ARM, pode considerar-se os critérios:

a) (PREC-ETP) < 0 - calculou-se o NAc pela seguinte equação:

$$NAc = \sum (PREC - ETP) < 0 \quad (11)$$

ou seja, os valores de (PREC-ETP) negativos, e posteriormente calcula-se o valor do ARM :

$$ARM = CAD e^{-|NAc/CAD|} \quad (12)$$

b) (PREC-ETP) > 0, calcula-se primeiro o ARM:

$$ARM = ARM anterior + (PREC - ETP) \quad (13)$$

e posteriormente calcula-se o NAc :

$$NAc = CAD \ln \left( \frac{ARM}{CAD} \right) \quad (14)$$

Para o cálculo da alteração de água no solo (ALT), utiliza-se a seguinte equação:

$$ALT = ARM - ARM anterior \quad (15)$$

A Evapotranspiração real (ETR) é calculada seguindo os critérios:

$$Se (PREC - ETP) < 0 \rightarrow ETR = P + |ALT| \quad (16)$$

$$Se (PREC - ETP) \geq 0 \rightarrow ETR = ETP \quad (17)$$

Para a determinação da DEF (Deficiência Hídrica = o quanto o sistema solo-planta deixou de evapotranspirar), utiliza-se a equação:

$$DEF = ETP - ETR \quad (18)$$

Para a determinação do EXC (Excedente hídrico, que corresponde à água que não pode ser retida e drena em profundidade = água gravitacional), considere-se os critérios:

$$Se \text{ ARM} < \text{CAD} \rightarrow \text{EXC} = 0 \quad (19)$$

$$Se \text{ ARM} = \text{CAD} \rightarrow \text{EXC} = (\text{PREC} - \text{ETP}) - \text{ALT} \quad (20)$$

#### **4 CONSEQUÊNCIAS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA**

As variabilidades climáticas, principalmente modificações na temperatura do ar, precipitação pluvial e evaporação, irão acarretar em alterações nos recursos hídricos, afetando o abastecimento humano, geração de energia e agricultura (SILVA; NÓBREGA; GALVÍNIO, 2009).

Segundo Marengo (2008), a ocorrência de mudanças climáticas pode provocar impactos no regime de precipitações, tanto no que se refere à sua quantidade quanto à sua distribuição, alterando a variabilidade e a disponibilidade na qualidade e quantidade de água para o uso. Essa modificação no clima e conseqüentemente nos recursos hídricos atingirá desde os biomas do planeta e toda a biodiversidade até a sociedade em geral, impactando os setores econômicos, como a agricultura.

No Brasil, a disponibilidade hídrica depende em grande parte das condições climáticas que por sua vez afetam a demanda hídrica. Esta influência das variáveis climáticas pode ser entendida pelo fato que a elevação da temperatura pode aumentar a capacidade do ar em reter vapor d'água o que aumenta a demanda para evapotranspiração das plantas. Sendo assim, as mudanças climáticas podem afetar o consumo de água para irrigação, a qual depende de como a evaporação e precipitação irão se comportar (IPCC, 2001).

Vários estudos indicam que o aumento na temperatura do ar, pode causar alterações no balanço hídrico de uma região e conseqüentemente modificar o zoneamento agrícola. Assad et al. (2004), ao avaliar os impactos do aumento na temperatura média do ar e incremento na precipitação pluvial, no zoneamento agroclimático do café (*Coffea arabica* L.) demonstraram que haverá um deslocamento da área produtiva para a região Sul do Brasil e uma redução de área apta para a cultura de 75% no Paraná, no caso de um aumento na temperatura de 5,8°C.

Conforme Pereira; Villa Nova e Sediyaama (1997), devido à circunstância, de que as mudanças climáticas poderão afetar o zoneamento agrícola, o monitoramento hidrológico para as mesorregiões se torna necessário, a fim de fornecer informações importantes para o planejamento de consumo de água. Em pesquisas de impacto de mudanças climáticas sobre agroecossistemas, um aspecto importante a quantificar é o efeito do aquecimento global sobre a disponibilidade hídrica do solo da qual depende o desenvolvimento vegetal de uma cultura (STRECK; ALBERTO, 2006).

Diante da importância para a agricultura e para a sociedade em geral do conhecimento da futura demanda de água frente às alterações do clima, alguns trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo de quantificar parâmetros envolvidos nesta estimativa e poder colaborar com políticas ambientais de uso e gerenciamento de água.

Streck e Alberto (2006) com o objetivo de simular o impacto da mudança climática projetada para os próximos 100 anos sobre o balanço de água no solo em agroecossistemas de trigo, soja e milho em Santa Maria, RS, concluíram que o aumento de CO<sub>2</sub> associado a aumentos de temperatura de até 6°C tendem a diminuir o conteúdo de água no solo.

Um estudo realizado por Liberato e Brito (2010) teve como objetivo investigar os possíveis impactos de cenários futuros das mudanças climáticas nos componentes do balanço hídrico da Amazonia Ocidental. Os resultados mostraram que o aumento de temperatura previsto nos cenários do IPCC é capaz de aumentar a evapotranspiração real, produzindo uma redução da umidade do solo.

Estudo realizado por Santos (2011) demonstrou um aumento considerável nas taxas de evapotranspiração potencial nos meses de agosto, setembro e outubro, uma vez que nesses meses deverão ocorrer os maiores aumentos nas temperaturas

médias. Das análises do balanço hídrico concluiu-se que, para a região do Programa de Assentamento Dirigido do Distrito Federal (PAD/DF), poderá ocorrer um aumento considerável no déficit hídrico em qualquer dos cenários futuros. Quanto ao excedente hídrico, notou-se que os cenários futuros apresentam valores inferiores aos cenários atuais.

Gondim et al. (2008) ao avaliar os impactos das mudanças climáticas na demanda de água para irrigação de culturas perenes, na Bacia do Jaguaribe, no estado do Ceará, conforme o modelo e cenários utilizados, concluíram que temperaturas mais elevadas causam maior demanda para evapotranspiração das plantas, com tendência de ocorrer aumento na demanda de água para irrigação, agravada pela redução da precipitação.

Horikoshi e Fisch (2007) realizaram um estudo a fim de elaborar o balanço hídrico atual para o município de Taubaté e analisar a questão da disponibilidade hídrica futura. De uma forma geral, os cenários climáticos futuros apontaram um aumento na temperatura do ar entre  $+0,5^{\circ}\text{C}$  a  $+ 2,7^{\circ}\text{C}$ , associado a um aumento da precipitação entre 80 e 150 mm. De acordo com os resultados, concluíram que as condições futuras provocarão um aumento do déficit de água (em torno de 50 a 80 mm) e uma diminuição do excedente hídrico (próximo a 200 mm).

## **5 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL**

Diante da importância dos recursos hídricos para o desenvolvimento de diversos setores econômicos, e também para o desenvolvimento social e ambiental, o estudo regional ou local da disponibilidade hídrica frente às mudanças climáticas se torna necessário. Sendo assim, uma análise espacial pode ser realizada com a utilização de um Sistema de Informações Geográficas (SIG). O SIG é definido por Xavier da Silva (1992) como uma ferramenta utilizada para estudar a distribuição espacial dos fenômenos, assim como sua evolução no tempo, e assim contribuir para solução dos problemas ambientais. Segundo Xavier et al. (2011) a aplicação do SIG é adequada para evidenciar as características do comportamento dos parâmetros do balanço hídrico, assim como sua variação espacial e temporal, possibilitando a interpretação de dados estimados para locais que não possuem dados observados.

Uma maneira de conseguir a espacialização desses dados é aplicando métodos de interpolação, através dos SIGs, como por exemplo, krigagem, ponderação inversa à distância e spline (Río et al., 2011). Segundo Hartkamp et al.(1999) a utilização da técnica spline é recomendada para interpolação de variáveis climáticas, considerando a revisão de erros, os pressupostos dos dados e a simplicidade computacional. Em alguns trabalhos o método spline é utilizado com o objetivo de espacializar variáveis climáticas, como os componentes do balanço hídrico (SENTELHAS; SANTOS ; MACHADO, 2008) e (ANGIOLELLA; VASCONCELLOS; ROSA, 2003). Porém, segundo alguns estudos, dentre as técnicas a krigagem ordinária é a que apresenta resultados mais eficazes na interpolação de variáveis hidrológicas (GARDIMAN JUNIOR et al.,2012; SILVA et al.,2011). Castro et al. (2010) analisando o desempenho de diferentes interpoladores concluíram que o método da krigagem é o mais eficiente para a espacialização dos parâmetros do balanço hídrico climatológico.

O método do spline é um método de interpolação que estima valores usando uma função matemática que minimiza a curvatura da superfície resultando em uma superfície suave que passa exatamente pelos pontos de entrada (ARCGIS RESOURCES, 2014).

A krigagem é um método que utiliza a geoestatística. Essa por sua vez, pode ser definida segundo Wanderley; Amorim e Carvalho (2012) como uma metodologia que permite estimar valores de dados regionalizados, permitindo assim uma análise espacial ou temporal de informações de um determinado local. No método da Krigagem, utiliza-se o semivariograma para expressar a dependência espacial entre os pontos que são utilizados como amostras (CARVALHO; SILVEIRA; VIEIRA, 2002). O semivariograma é um gráfico de dispersão da semivariância versus a distância entre os pontos amostrados. Quando o estimador da krigagem considera as médias locais a partir das amostras vizinhas e não uma única média estacionária, tem-se a krigagem ordinária (FELGUEIRAS, 1999).

## CAPÍTULO I

### DISPONIBILIDADE HÍDRICA DO SOLO EM PONTA GROSSA-PR, BRASIL, A PARTIR DA SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS CLIMÁTICOS IMPACTADOS POR MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS

#### RESUMO

O impacto das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica do solo vem sendo observado em diversas pesquisas. Devido à importância econômica, ambiental e social da água, a gestão adequada desse recurso natural se torna um grande desafio aos pesquisadores. Diante disso o objetivo desse estudo foi analisar o impacto das possíveis alterações no clima na disponibilidade hídrica do solo no município de Ponta Grossa, Paraná. Utilizou-se o PGECLIMA\_R, um gerador estocástico que permite a simulação de séries de dados climáticos diários. Os padrões do clima gerados são estatisticamente semelhantes aos padrões dos dados históricos. Na simulação consideraram-se os cenários climáticos projetados no quarto relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - IPCC-AR4. Ao estimar a evapotranspiração pelo método de Thornthwaite (1948) e o balanço hídrico através do método de Thornthwaite e Matter (1955) pode-se analisar os índices climáticos. Comparou-se o saldo hídrico mensal do período base (1980-2009) com o dos períodos simulados de 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2099, nos diferentes cenários climáticos. Por meio de gráficos, observou-se que o município de Ponta Grossa não demonstrou deficiência hídrica no período atual e mesmo com o possível aquecimento global, o local de estudo não apresentará déficit hídrico, pois está numa região que não apresenta problemas com a falta de precipitação.

**Palavras-chave:** Simulação climática. Balanço hídrico. PGECLIMA\_R.

## ABSTRACT

The impact of climate change on soil water availability has been observed in several studies. Due to the economic, environmental and social importance of water, the adequate management of this natural resource becomes a great challenge to researchers. Therefore, the aim of this study was to analyze the impact of possible changes of climate on water availability in the soil in the municipality of Ponta Grossa, Paraná State, Brazil. The PGECLIMA\_R, a stochastic generator that enables the simulation of daily weather data series was used for the analyses. Weather patterns generated are statistically similar to patterns of historical data. In the simulation were considered the climate scenarios presented in the fourth report of the Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC AR4. By estimating evapotranspiration with the Thornthwaite method (1948) and the water balance through the method of Thornthwaite and Matter (1955) it is possible to analyze the climate indices. Comparisons were made among the monthly water balance of the base period (1980-2009) with the simulated periods 2010-2039, 2040-2069 and 2070-2099, in different climate scenarios. Through graphs, was observed that the municipality of Ponta Grossa did not show water deficit in the current period. Even under possible global warming scenarios, it would not present drought, because the region does not have problems with deficit of precipitation.

**Keywords:** Climate simulation. Water balance. PGECLIMA\_R.

## 1 INTRODUÇÃO

Diante da importância e da grande demanda mundial da água, o conhecimento da disponibilidade deste recurso natural se torna necessário, uma vez que, segundo Sánchez-Román; Folegatti e Orellana-González (2009), a sustentabilidade ambiental é um aspecto relevante a ser considerado pelos diversos setores políticos, econômicos e sociais ao atuarem na gestão integrada dos recursos hídricos.

Conforme relatório da ANA-Agência Nacional de Águas (ANA, 2007) sobre as perspectivas ambientais brasileiras, a agricultura irrigada é considerada o maior usuário de água doce, tendo em vista que o grande consumo é explicado pela necessidade hídrica no processo metabólico das plantas, que depende diretamente da quantidade de água disponível no solo (PIRES et al., 2008). Sendo assim, a determinação hídrica do solo é fundamental para o correto planejamento e gerenciamento de um sistema de irrigação.

De maneira geral a determinação da disponibilidade hídrica do solo é realizada pela estimativa do balanço hídrico que permite contabilizar as entradas e as saídas do sistema. Segundo Pereira; Angelocci e Sentelhas (2007) o principal componente de entrada é representado pela precipitação pluvial. A contribuição do orvalho é considerada desprezível, uma vez que só assume importância em regiões muito áridas. O mesmo ocorre para entrada de água através da ascensão capilar, que por ser uma fração muito pequena também é desconsiderada. A Evapotranspiração (ET) é o principal componente de saída de água do sistema hídrico, especialmente nos períodos secos, ao passo que a drenagem profunda constitui-se em outro meio de saída de água e é responsável pelo controle do volume de solo nos períodos excessivamente chuvosos. Os fluxos horizontais de água, escoamento lateral e drenagem lateral, se compensam e, portanto anulam-se.

A ET compreende a perda conjunta da água para atmosfera pelos processos de evaporação da água do solo e da vegetação úmida e da transpiração das plantas. Pode ser definida, dependendo das condições locais, como Evapotranspiração Potencial (ETP) e Evapotranspiração Real (ETR). Sua estimativa, assim como a do balanço hídrico do solo permite o diagnóstico da quantidade e frequência de água utilizada nas irrigações o que se torna essencial ao manejo sustentável dos recursos hídricos (SILVA et al., 2012).

O Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC - (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas) foi estabelecido, em 1988, pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). O IPCC foi criado para avaliar a variabilidade do clima e seus possíveis riscos à sociedade, e por meio de trabalhos científicos fornecer informações técnicas e socioeconômicas sobre as mudanças climáticas (MARENGO, 2008). O Quarto Relatório Científico do IPCC (IPCC, 2007) sugere, como melhor estimativa, um aumento de 4,0°C na temperatura média global para o pior cenário e um acréscimo de 1,8°C no melhor cenário, também conclui, com confiança acima de 90%, que o aquecimento global dos últimos cinquenta anos é causado pelas atividades humanas.

Segundo Marengo (2008), a ocorrência de mudanças climáticas, pode provocar impactos no regime de precipitações, alterando a variabilidade e a disponibilidade na qualidade e quantidade de água para o uso. Esta temática foi abordada anteriormente por Carvalho e Stipp (2004) num estudo do balanço hídrico no estado do Paraná, Brasil, onde foi possível monitorar as temperaturas médias e a distribuição das precipitações, durante um período de um ano e, concluíram que de maneira geral, não ocorrem situações de deficiência hídrica no Estado. Porém variabilidades climáticas, principalmente modificações na temperatura e precipitação, podem mudar este cenário atual de excesso hídrico para déficit hídrico.

Diante da importância para a agricultura e para a sociedade em geral do conhecimento da futura demanda de água, várias pesquisas foram conduzidas com o objetivo de quantificar parâmetros envolvidos nesta estimativa e poder colaborar com políticas ambientais de uso e gerenciamento de água.

Um estudo realizado por Liberato e Brito (2010) teve como objetivo investigar os possíveis impactos de cenários futuros das mudanças climáticas nos componentes do balanço hídrico da Amazônia Ocidental. Os resultados mostraram que o aumento de temperatura previsto nos cenários do IPCC é capaz de aumentar a evapotranspiração real, produzindo uma redução da umidade do solo.

Coutinho e Moraes (2012), com o objetivo de investigar as possíveis alterações nas condições hídricas no município de São José de Mipibu – RN em decorrência do aquecimento global, observaram que o balanço hídrico sofrerá impacto, visto que o aumento na temperatura aumentará a evaporação.

Resultados obtidos por Santos e Sentelhas (2012) demonstraram que para todos os cenários projetados, independentemente do aumento ou redução na precipitação, houve um aumento na ETP e ETR e um aumento do déficit de água, para todas as regiões analisadas no Estado de São Paulo.

Em pesquisas de impacto de mudanças climáticas sobre agroecossistemas, um aspecto importante a quantificar é o efeito do aquecimento global sobre a disponibilidade hídrica do solo da qual, por exemplo, depende o desenvolvimento vegetal de uma cultura (STRECK; ALBERTO, 2006). Dentro deste contexto, modelos para simulação de dados climáticos, baseados em séries históricas são aplicados em estudos agrônômicos, no que se refere às produções agrícolas, e de sistemas hidrológicos, no que tange à racionalização de recursos hídricos destinados à irrigação (RICKLI; CATANEO; VIRGENS FILHO, 2008). Assim, vários pesquisadores têm proposto geradores estocásticos de séries climáticas, o CLIGEN (NICKS; HARP, 1980), o WGEN (RICHARDSON; WRIGHT, 1984), o LARS-WG (SEMENOV; BARROW, 1997), sendo que no Brasil destaca-se o PGECLIMA\_R (VIRGENS FILHO et al., 2013).

De maneira geral, segundo Semenov (2008), um gerador estocástico de dados climáticos é um modelo capaz de gerar padrões meteorológicos diários que são estatisticamente semelhantes aos padrões dos dados históricos. Estes geradores são utilizados em estudos climáticos como uma ferramenta computacional de baixo custo que pode gerar informações sobre o clima, mudando os cenários com base na saída de modelos climáticos globais. Assim, várias pesquisas interdisciplinares usando os geradores de dados climáticos têm sido conduzidas (BAE; JUNG; LETTENMAIER, 2011; CHEN; BRISSETTE; LCONTE, 2011; FATICHI; IVANOV; CAPORALI, 2011; ZHANG et al., 2011). Estas pesquisas objetivam avaliar os efeitos das alterações climáticas em escala espacial local, supondo que as principais fontes de incerteza climáticas estão ligadas aos modelos de circulação global da atmosfera (GCM's) e cenários de emissões de gases de efeito estufa.

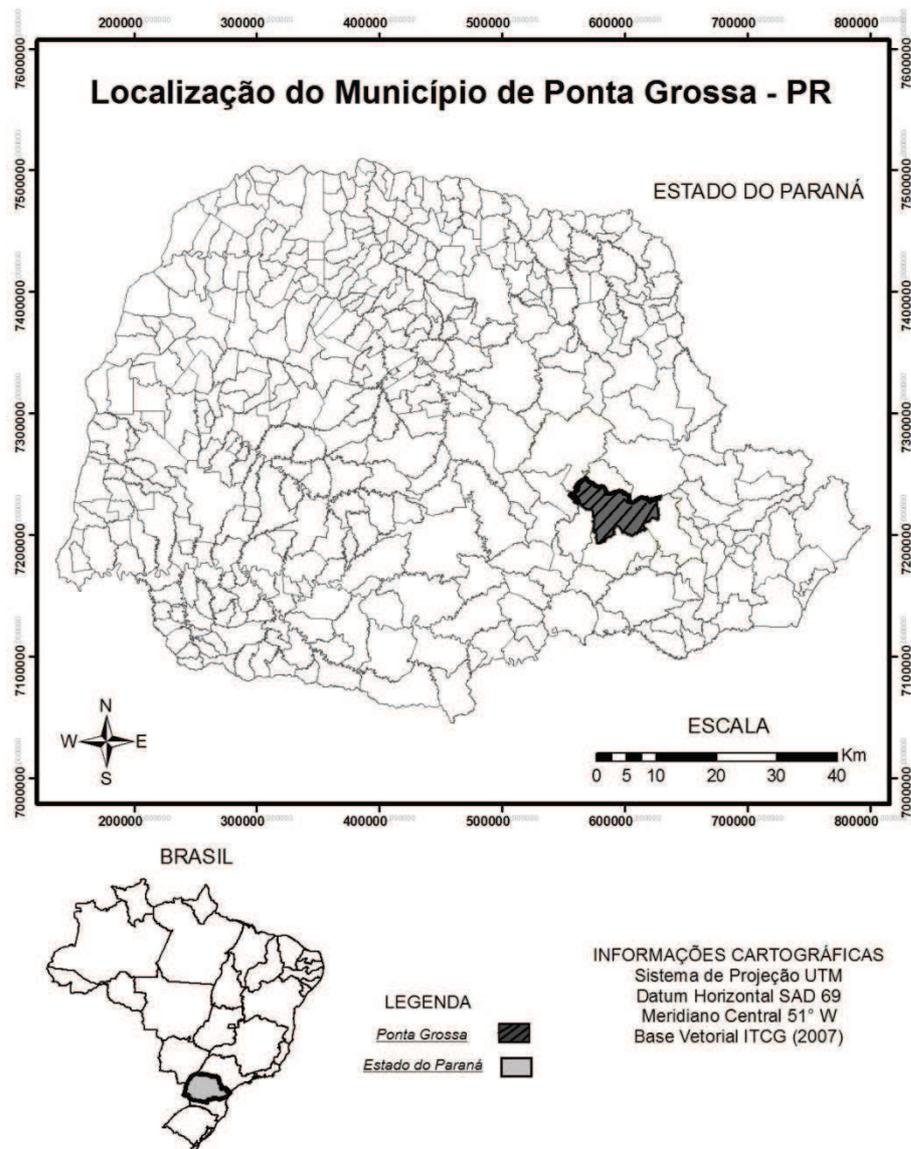
O município de Ponta Grossa, assim como o estado do Paraná, tem a agricultura como um dos pilares da sua economia. Diante do fato que as alterações do clima influenciam diretamente o regime hídrico dos agroecossistemas, esse trabalho teve como objetivo avaliar, por meio de simulação computacional utilizando o gerador climático PGECLIMA\_R, os possíveis impactos das mudanças climáticas

globais na disponibilidade hídrica do solo no município de Ponta Grossa, PR, no período de 2010 a 2099.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

A presente pesquisa foi conduzida junto ao Laboratório de Estatística Computacional e Aplicada - LECA, da Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG no estado do Paraná, Brasil, onde se procedeu a organização dos dados meteorológicos cedidos pelo Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), os quais foram coletados junto a uma Estação Meteorológica (altitude de 850 m, latitude 25°5'37 S e longitude 50°03'35), no município de Ponta Grossa, Paraná. Este município está localizado na Região Centro-leste do estado do Paraná, Brasil (Figura 1.1) e apresenta clima subtropical, úmido, classificado segundo Köppen como Cfb (MAACK, 2012).

Figura 1.1- Cartograma de localização de Ponta Grossa-PR.



Fonte: Elaborado por Elisana Milan e Gabriela Leite Neves.

A série de dados climáticos utilizados consistiu de registros diários de precipitação (PREC) em milímetros, temperatura máxima (TMAX) e mínima (TMIN) do ar, em graus Celsius e corresponde a um período de observação de 30 anos, de 1980 até 2009. Para proceder às estimativas das médias anuais, os dados de TMAX, TMIN e PREC foram organizados em planilhas eletrônicas, onde foram separados mensalmente. A partir dos dados de temperatura média do ar (TMED) estimou-se a evapotranspiração potencial (ETP) por meio do método de

Thornthwaite (1948), que tem como variáveis de entrada apenas a (TMED), e as coordenadas geográficas do local, fato que justifica a escolha dessa metodologia.

Considerando a ETP estimada e os dados de PREC, também organizados por mês, com o intuito de determinar a disponibilidade hídrica, empregou-se o método de Thornthwaite e Mather (1955) para a elaboração do balanço hídrico climatológico (BHC). A escolha deste método de estimativa de BHC deve-se a disponibilidade dos dados climáticos e por ter sido desenvolvido para regiões de clima úmido (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007).

Seguindo os passos e as considerações da metodologia, calculou-se o armazenamento de água no solo (ARM), o negativo acumulado (NAc), a alteração de água no solo (ALT), a evapotranspiração real (ETR), a deficiência hídrica (DEF) e o e excedente hídrico (EXC), sendo que já se conhece PREC, ETP e os níveis da capacidade de água disponível (CAD) que foram de 75mm, 100mm, 125mm e 150 mm.

Para caracterização do regime hídrico do estado do Paraná, também foram calculados os índices climáticos de aridez ( $I_a$ ), de umidade ( $I_u$ ) e hídrico ( $I_h$ ).

O  $I_a$  caracteriza-se por indicar a escassez hídrica expressa em percentagem em função da DEF e da ETP, ambas anuais, estimado por meio de:

$$I_a = 100 * (DEF / ETP) \quad (1.1)$$

O  $I_u$  representa o excedente hídrico expresso em percentagem em função do EXC e da ETP, ambos anuais, e estimado segundo a expressão:

$$I_u = 100 * (EXC / ETP) \quad (1.2)$$

Tendo em vista que ao longo do ano ocorrem períodos de excesso e falta de água, define-se o  $I_h$  como sendo:

$$I_h = I_u - 0,6 * I_a \quad (1.3)$$

Para a simulação das séries de dados climáticos diários no período de 2010 a 2099 foi utilizado o gerador de dados climáticos PGECLIMA\_R, levando-se em consideração as alterações projetadas pelo quarto relatório do IPCC (IPCC, 2007), que sugere, como melhor estimativa, um aumento de 4,0°C na temperatura média global para o pior cenário e um acréscimo de 1,8°C no melhor cenário. As alterações na precipitação pluviométrica foram projetadas tendo em vista uma variação de 10% no total mensal para cada variação de 1°C na temperatura, conforme Pike (2005). Após a geração da série simulada, para cada cenário, os dados foram organizados,

com a finalidade de obter os valores de TMED e PREC para cada mês em cada subperíodo simulado, de 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2099.

Com esses valores pode-se estimar a ETP assim como o BHC, conforme descrito anteriormente, e por meio do EXC, DEF E ETP chegou-se aos valores dos índices climáticos para o cenários futuros, os quais foram comparados aos índices climáticos para as condições atuais de Ponta Grossa, objetivando verificar como e quando haverá mudanças nos componentes do balanço hídrico climatológico, em função dos diferentes incrementos de temperatura média do ar decorrentes das mudanças climáticas globais.

Com o intuito de representar resumida e esquematicamente a disponibilidade hídrica do solo no município de Ponta Grossa, foram elaborados gráficos que auxiliaram na análise dos impactos das possíveis mudanças climáticas no regime hídrico do solo, confrontando o saldo hídrico mensal do período base (1980-2009) com o dos subperíodos simulados de 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2099, nos diferentes cenários climáticos e níveis de capacidade de água disponível (CAD's).

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os elementos meteorológicos locais, temperatura máxima (TMAX) e mínima (TMIN) do ar e precipitação (PREC) encontram-se expostos na Tabela 1.1, onde se observa que durante o período compreendido entre os anos de 1980 a 2009 verificou-se que os menores valores de TMAX foram registrados durante os meses de maio, junho e julho e de TMIN em junho, julho e agosto. Os maiores valores de temperatura do ar, tanto máxima quanto mínima, foram registrados durante os meses de dezembro, janeiro e fevereiro. As temperaturas médias anuais das variáveis analisadas, para o período em questão foram de 23,9 °C para TMAX e de 13,7 °C para TMIN, resultando em uma temperatura média anual de 18,8 °C. O mês mais frio (julho) apresentou temperatura média de 14,6°C, e o mês mais quente (janeiro), apresentou temperatura média de 22,4 °C. Esses valores concordam com a classificação segundo Köppen como Cfb, onde a temperatura média no mês mais frio se encontra abaixo de 18°C (mesotérmico), a temperatura média no mês mais quente acima de 22 °C e a temperatura média anual de aproximadamente 19 °C.

**Tabela 1.1** - Valores médios mensais de temperatura máxima e mínima do ar e totais mensais médios de precipitação registrados no município de Ponta Grossa, PR, no período de 1980 a 2009.

<b>MÊS</b>	<b>TMAX</b>	<b>TMIN</b>	<b>PREC</b>
	<b>°C</b>	<b>°C</b>	<b>mm</b>
<b>Jan</b>	27,4	17,4	187,3
<b>Fev</b>	27,1	17,6	162,8
<b>Mar</b>	26,4	16,6	137,1
<b>Abr</b>	24,4	14,4	105,5
<b>Mai</b>	21,1	11,3	144,4
<b>Jun</b>	19,8	9,8	126,9
<b>Jul</b>	19,9	9,4	106,0
<b>Ago</b>	21,6	10,4	74,4
<b>Set</b>	21,9	11,8	151,6
<b>Out</b>	24,1	13,7	166,8
<b>Nov</b>	26,2	15,2	120,1
<b>Dez</b>	26,8	16,6	153,1
<b>VALORES</b>			
<b>MÉDIOS</b>	23,9	13,7	1636,1

Analisando o período de 1980 até 2009, nota-se que a PREC variou de 74,4 mm a 187,3 mm para os meses de agosto e janeiro, respectivamente e o total de precipitação média anual normal foi de 1636,1 mm. (Tabela 1.1). O período mais seco corresponde aos meses de abril, julho e agosto, com precipitação de 105,5 mm, 106,0 mm e 74,4 mm, respectivamente. O período mais chuvoso, janeiro, fevereiro e outubro apresentou precipitação de 187,3 mm, 162,8 mm e 166,8 mm respectivamente. De acordo com Maack (2012), na cidade de Ponta Grossa as chuvas são bem distribuídas ao longo do ano e todos os meses são úmidos.

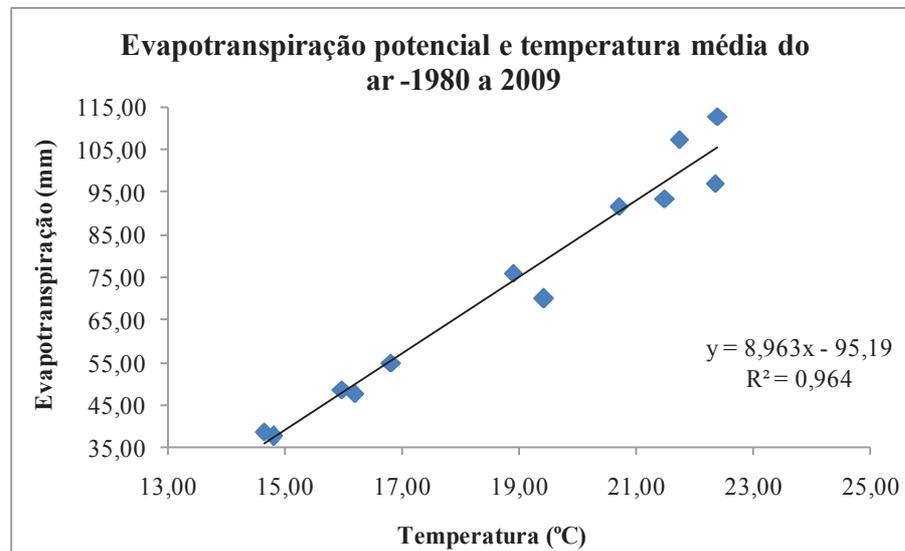
A partir dos valores de TMED, calculou-se a ETP para o local em estudo e verificou-se que o maior valor ocorreu durante o mês de janeiro (113,0 mm), enquanto o oposto foi obtido durante o mês de junho (37,6 mm) (Tabela 1.2).

**Tabela 1.2** - Estimativa da evapotranspiração potencial no município de Ponta Grossa, PR, no período de 1980 a 2009.

<b>MÊS</b>	<b>TMED</b>	<b>ETP</b>
	<b>°C</b>	<b>Mm</b>
<b>Jan</b>	22,4	113,0
<b>Fev</b>	22,3	97,1
<b>Mar</b>	21,5	93,6
<b>Abr</b>	19,4	70,1
<b>Mai</b>	16,2	47,9
<b>Jun</b>	14,8	37,6
<b>Jul</b>	14,6	38,9
<b>Ago</b>	16,0	48,7
<b>Set</b>	16,8	55,0
<b>Out</b>	18,9	76,1
<b>Nov</b>	20,7	91,9
<b>Dez</b>	21,7	107,5
<b>TOTAL</b>	-	877,3
<b>MÉDIA</b>	18,8	73,1

A relação direta entre a variável ETP e a TMED pode ser verificada analisando o coeficiente de determinação  $r^2$  obtido por meio de regressão linear simples entre as variáveis em questão, o qual apresentou um valor de 0,96 (Figura 1.2), relação esta que pode ser explicada pelo fato de que ao longo de um dia, o aumento da temperatura do ar provoca aumento no déficit de saturação, tornando maior a demanda evaporativa do ar, elevando assim a ETP (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007).

**Figura 1.2** - Relação entre a evapotranspiração potencial estimada pela metodologia de Thornthwaite (1948) e a temperatura média do ar, durante o período compreendido entre 1980 e 2009 no município de Ponta Grossa, PR.



O Balanço hídrico do período de 1980 a 2009 é apresentado na Tabela 3, onde se observa que não houve valores de negativo acumulado, visto que o volume de precipitação foi superior a ETP, e a diferença (P-ETP) foi maior que zero em todos os meses, sendo a diferença total de 758,8 mm, valor que representa o excedente hídrico total. Para todos os CADs analisados, o excedente hídrico variou de 25,7 mm para o mês de agosto a 96,6 mm, para o mês de setembro. Não se observou diferença entre os CADs, pois como não houve negativo acumulado, o armazenamento do solo atingiu o limite, ou seja,  $ARM=CAD$ , e como não houve alteração do solo a ETR permaneceu igual à ETP (Tabela 1.3). Sendo assim pode se dizer que no período analisado e nas condições climáticas atuais, o município de Ponta Grossa não apresenta deficiência hídrica, e apresenta excedente total de 758,8mm, o que concorda com os resultados obtidos por Carvalho e Stipp (2004), que usando o mesmo método de estimativa, observaram que, no geral, o estado do Paraná não apresenta deficiência hídrica, e que o município de Ponta Grossa apresenta balanço hídrico médio, que significa ausência de déficit e excedente de até 798,3 mm, para um CAD de 100 mm.

**Tabela 1.3** - Estimativa do balanço hídrico referente ao período de 1980 a 2009 para CAD= 75.00 mm.

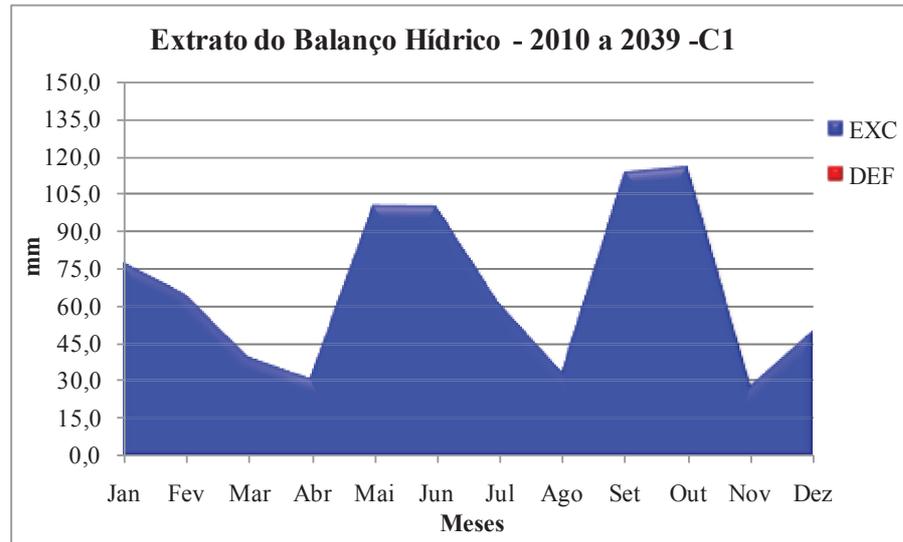
<b>MÊS</b>	<b>(P-ETP) Nac</b>	<b>ARM</b>	<b>ALT</b>	<b>ETR</b>	<b>DEF</b>	<b>EXD</b>
	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>Mm</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>
Jan	74,3	0,0	75,0	0,0	113,0	74,3
Fev	65,7	0,0	75,0	0,0	97,1	65,7
Mar	43,5	0,0	75,0	0,0	93,6	43,5
Abr	35,5	0,0	75,0	0,0	70,1	35,5
Mai	96,5	0,0	75,0	0,0	47,9	96,5
Jun	89,3	0,0	75,0	0,0	37,6	89,3
Jul	67,2	0,0	75,0	0,0	38,9	67,2
Ago	25,7	0,0	75,0	0,0	48,7	25,7
Set	96,6	0,0	75,0	0,0	55,0	96,6
Out	90,7	0,0	75,0	0,0	76,1	90,7
Nov	28,2	0,0	75,0	0,0	91,9	28,2
Dez	45,6	0,0	75,0	0,0	107,5	45,6
<b>TOTAIS</b>	<b>758,8</b>			<b>0,0</b>	<b>877,3</b>	<b>758,8</b>
<b>MÉDIAS</b>	<b>63,2</b>			<b>0,0</b>	<b>73,1</b>	<b>63,2</b>

Com o intuito de analisar se essa condição atual de disponibilidade hídrica se alterará com as mudanças climáticas globais, as estimativas do BHC foram obtidas segundo as projeções feitas pelo IPCC-AR4 (IPCC, 2007). Assim, considerando-se os dois cenários, ou seja, aumento de 4,0°C na temperatura (C1) e aumento de 1,8°C na temperatura (C2) obteve-se o extrato do balanço hídrico para os períodos simulados.

Para o período de 2010 a 2039, no C1 o excedente hídrico variou de 27,7 mm para o mês de novembro a 115,2 mm para o mês de outubro. Em comparação ao período atual (1980-2009), pode-se observar que para os valores totais, houve um aumento de 88,6 mm na precipitação, um aumento de 37,0 mm na

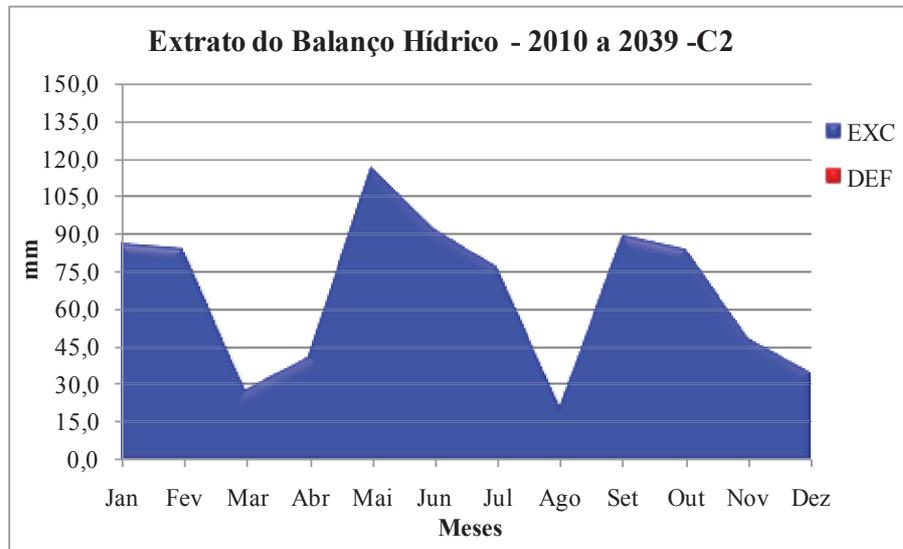
evapotranspiração potencial e um aumento de 51,6 mm no excedente hídrico total que foi de 810,4 mm (Figura 1.3).

**Figura 1.3** - Extrato do balanço hídrico para o período simulado de 2010 a 2039 com aumento de 4,0°C na temperatura (C1), para o município de Ponta Grossa, PR.



Já considerando um aumento de 1,8°C na temperatura média, para o período de 2010 a 2039 o excedente hídrico variou de 20,9 mm para o mês de agosto a 116,0 mm para o mês de maio, a precipitação total teve um acréscimo de 53,9 mm, a evapotranspiração potencial total um acréscimo de 15,3 mm e o excedente hídrico total, um acréscimo de 38,7 mm, em relação ao período de base (1980-2009) (Figura 1.4).

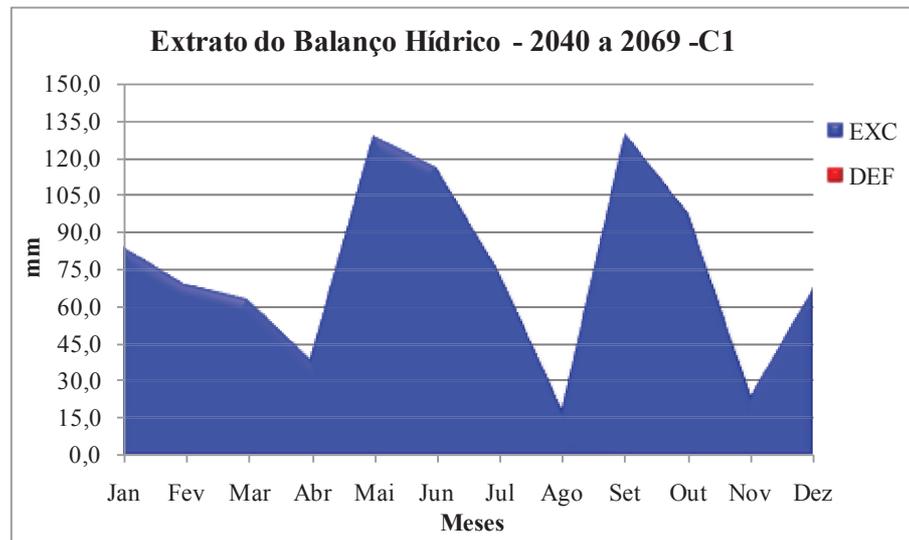
**Figura 1.4** - Extrato do balanço hídrico para o período simulado de 2010 a 2039 com aumento de 1,8°C na temperatura (C2), para o município de Ponta Grossa, PR.



Observa-se que o aumento da temperatura do ar, tanto de 4,0°C como de 1,8°C foi responsável pelo aumento da ETP, porém devido às distribuições das precipitações simuladas, o excedente hídrico também aumentou. Resultado diferente foi obtido por Coutinho e Moraes (2012), que observaram que mesmo com aumento da PREC, houve redução do EXC em dois meses, enquanto que o déficit hídrico aumentou bastante, sendo assim o aumento da temperatura do ar, mesmo com o aumento da PREC, responsável pelo impacto do BHC no município de São José de Mipibu – RN.

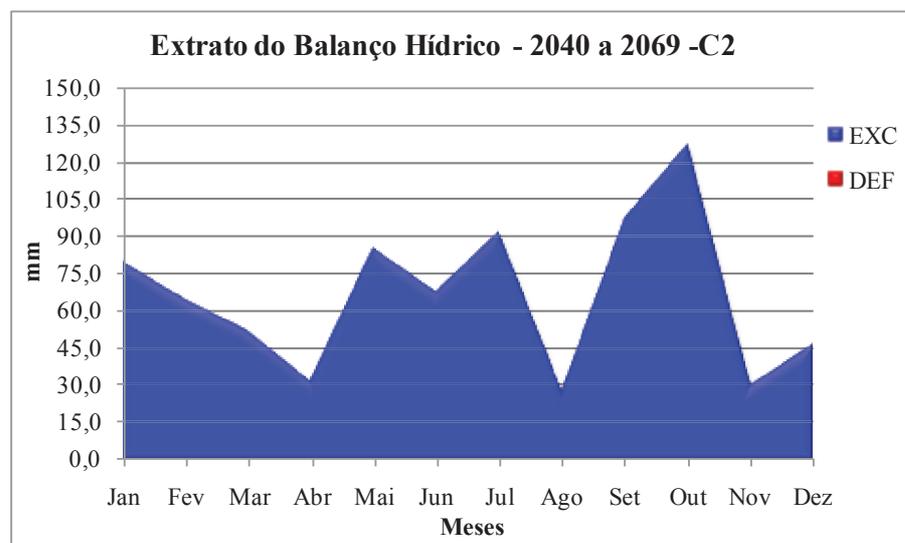
Da mesma forma, obteve-se o extrato do balanço hídrico para o período de 2040 a 2069, onde no primeiro cenário, o excedente hídrico variou de 18,4 mm para o mês de agosto a 129,5 mm para o mês de setembro. Em comparação ao período atual (1980-2009), pode-se observar que houve um aumento de 271,5 mm na precipitação, um aumento de 120,8 mm na evapotranspiração potencial e um aumento de 150,7 mm no excedente hídrico (Figura 1.5).

**Figura 1.5** - Extrato do balanço hídrico para o período simulado de 2040 a 2069, com aumento de 4,0°C na temperatura (C1), para o município de Ponta Grossa, PR.



No segundo cenário, o excedente hídrico variou de 27,7 mm para o mês de agosto a 126,7 mm para o mês de outubro, sendo que a precipitação teve um acréscimo de 89,5 mm, a evapotranspiração um acréscimo de 48,6 mm e o excedente hídrico, um acréscimo de 40,9 mm, em relação ao período de 1980 a 2009 (Figura 1.6).

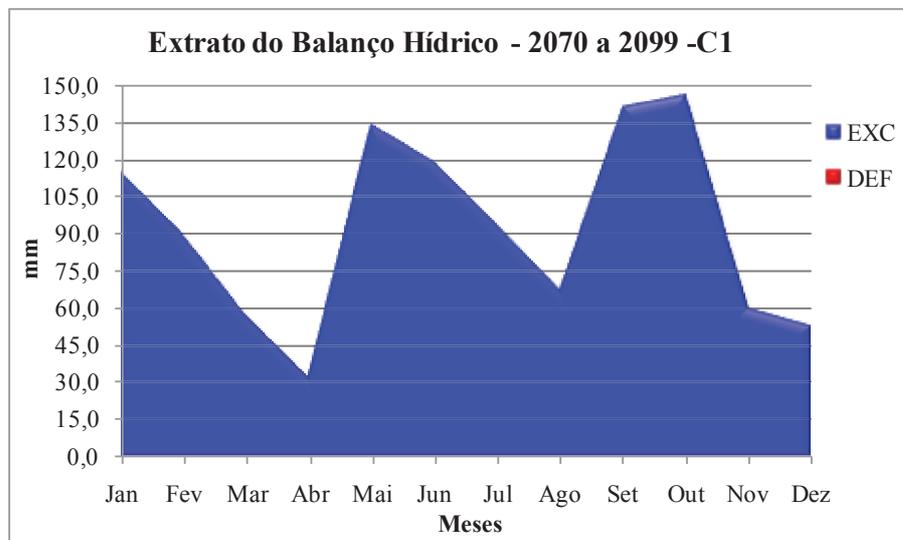
**Figura 1.6** - Extrato do balanço hídrico para o período simulado de 2040 a 2069 com aumento de 1,8°C na temperatura (C2), para o município de Ponta Grossa, PR.



Em relação ao primeiro período, houve maior aumento nas variáveis ETP, PREC e EXC, nos dois cenários considerados. Os valores totais de EXC foram de 909,5 mm e 799,7 mm para o primeiro e segundo cenário respectivamente. Não houve déficit hídrico com o aumento da temperatura o que diverge dos estudos de Liberato e Brito (2010) que ao analisar o impacto do aumento de 3,0°C e 1,8°C na temperatura média do ar observaram uma redução na umidade do solo com CAD de 150 mm, da Amazônia Ocidental.

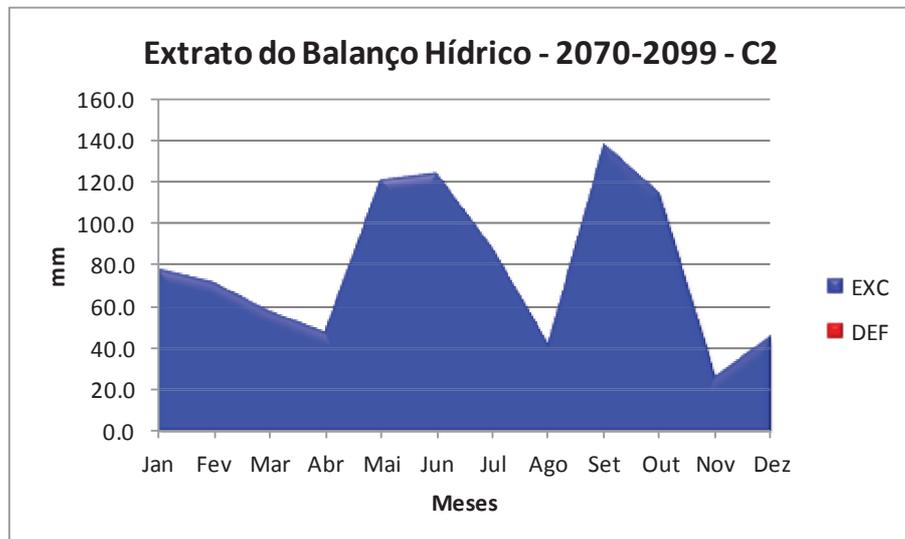
Para o período de 2070 a 2099, no primeiro cenário, o excedente hídrico variou de 32,1 mm para o mês de abril a 146,0 mm para o mês de outubro. Em comparação ao período atual (1980-2009), pode-se observar que houve um aumento de 580,8 mm na PREC total, um aumento de 232,0 mm na ETO total e um aumento de 348,8 mm no EXC total (Figura 1.7).

**Figura 1.7-** Extrato do balanço hídrico para o período simulado de 2070 a 2099, com aumento de 4,00°C na temperatura (C1), para o município de Ponta Grossa, PR.



No segundo cenário, o excedente hídrico variou de 26,4 mm para o mês de novembro a 137,8 mm para o mês de setembro, sendo que no segundo cenário a precipitação teve um acréscimo de 279,5 mm, a evapotranspiração um acréscimo de 85,1 mm e o excedente hídrico, um acréscimo de 194,5 mm, em relação ao período de 1980 a 2009 (Figura 1.8).

**Figura 1.8** - Extrato do balanço hídrico para o período simulado de 2070 a 2099 com aumento de 1,8°C na temperatura (C2), para o município de Ponta Grossa, PR.



Os valores do EXC para este período assumiram maiores valores em relação aos outros períodos, 1107,6 mm para o C1 e 953,3 mm para o C2. No entanto o aumento da temperatura do ar e a alteração da precipitação não foram suficientes para provocar a redução de disponibilidade hídrica do solo.

Observa-se que para todos os períodos e cenários não houve deficiência hídrica para o município de Ponta Grossa, e da mesma forma que para o período atual, não houve negativo acumulado. Portanto não se encontrou diferença entre os CADs, pois como o armazenamento do solo atingiu o limite, (ARM=CAD), e como não houve alteração do solo a ETR permaneceu igual a ETP.

A não presença de déficit hídrico para o município de Ponta Grossa pode ser explicada pelo fato de que essa localidade apresenta elevados totais pluviométricos que são distribuídos ao longo do ano. Sendo assim, o aumento de temperatura e o aumento de 10% no total mensal de precipitação, correspondente à variação de 1°C, são responsáveis pelo aumento ainda mais da quantidade de precipitação local. Resultados diferentes foram observados por Santos e Sentelhas (2012), que demonstraram que para todos os cenários projetados, independentemente do aumento ou redução na precipitação, houve um aumento na evapotranspiração potencial e real e um aumento do déficit de água, para todas as regiões analisadas no Estado de São Paulo.

Analisando os índices do regime hídrico para o município de Ponta Grossa, todos os períodos e cenários considerados apresentaram  $Ia$  iguais à zero, já que não houve déficit hídrico para nenhuma das condições, diante disso os índices hídricos assumiram os mesmos valores dos índices de umidade. Para o período base (1980-2009) o  $Ih$  foi de 86,5, enquanto para o período de 2010 a 2039 os  $Ih$  foram de 88,6 para o C1 e 89,4 para o C2. Para o período de 2040 a 2069, no C1 o  $Ih$  foi de 91,1 e no C2 foi de 86,4. No último período (2070-2099) os  $Ih$  foram de 99,9 para o C1 e 99,1 para o C2.

Para todos os períodos analisados, exceto para o período de 2010 a 2039, os maiores índices hídricos foram obtidos com o aumento de 4,0°C. Seguindo a classificação climática de Thornthwaite (1948), pode-se concluir que o município de Ponta Grossa, tanto no período atual quanto nos períodos simulados, é classificado como B4, ou seja, tipo de clima úmido, pois o  $Iu$  está no intervalo entre 80 e 100, e subtipo r (sem deficiência hídrica), pois os  $Ia$  foram nulos.

#### 4 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o município de Ponta Grossa não apresenta deficiência hídrica. Nas simulações realizadas, observa-se que o aumento de temperatura do ar é responsável pelo aumento da evapotranspiração potencial, porém o aumento da precipitação, em todas as condições analisadas foi maior que o aumento da ETP. Sendo assim não houve negativo acumulado e nem alteração do solo, nos diferentes cenários climáticos e níveis de capacidade de água disponível (CAD's).

A simulação de alteração climática para o município de Ponta Grossa demonstra que mesmo com os futuros cenários de aquecimento global, é provável que não haverá déficit hídrico, pois é uma localidade que não apresenta problemas com a falta de precipitação. Recomenda-se que o estudo do impacto das mudanças climáticas no balanço hídrico do solo seja aplicado para todo o Estado do Paraná, o qual apresenta variabilidade na precipitação pluviométrica, o que poderá ser responsável por um impacto negativo na quantidade de água do solo.

## CAPÍTULO II

### ANÁLISE TEMPORAL E ESPACIAL DA TEMPERATURA DO AR NO ESTADO DO PARANÁ, BRASIL

#### RESUMO

Diante da importância da análise de séries climatológicas e da variabilidade das temperaturas locais, este estudo objetivou avaliar a tendência temporal e espacial da temperatura máxima e mínima do ar do estado do Paraná, Brasil. Utilizou-se dados diários de 28 localidades, os quais foram organizados mensalmente em planilhas eletrônicas. A magnitude das tendências foi obtida por meio da regressão linear e a significância estatística a partir do teste não paramétrico de Mann-Kendall. A distribuição espacial das alterações encontradas foi representada em mapas georreferenciados elaborados pelo ARCGIS v.10.0 pelo método de interpolação spline. Os resultados encontrados nas análises revelam que o estado do Paraná possui uma grande variabilidade nas alterações de temperatura do ar, já que observou-se reduções de 0.5 a aumentos de 0.6 °C/década entre os municípios analisados, sendo que, os aumentos ocorreram principalmente durante o inverno e a primavera e as reduções na estação outono. Pelo fato de que as alterações variaram muito e poucas localidades apresentaram tendência significativa, não foi possível definir uma simultaneidade entre as tendências, porém essas diferentes alterações podem ser explicadas pelos fatores locais, como relevo, vegetação e atividades regionais. Sendo assim sugere a relação dos estudos de séries climatológicas individuais com os fatores locais para que se possa evitar as piores consequências das mudanças climáticas.

**Palavras-chave:** Tendência climática. Mann-Kendall. Estado do Paraná.

## ABSTRACT

Considering the importance of climatologic series and the local temperature variability analyses, this study aimed to evaluate the temporal and spatial trend of maximum and minimum air temperature in the State of Paraná, Brazil. Data collected daily from 28 places and organized monthly in electronic spreadsheets were used. The trend magnitude was obtained through linear regression and statistical significance using the Mann-Kendall non-parametric test. The spatial distribution of changes found was represented in geo-referenced maps elaborated through the ARCGIS v.10.0 with the spline interpolation method. The results revealed that the State of Paraná presents great variability in air temperature changes, with differences between places ranging from reductions of 0.5 reductions to increases of 0.6 °C/decade. These increases occurred mainly during the winter and the spring and reductions in the autumn. Due to the fact that the alterations varied significantly and few places presented steady trends, it was not possible to define simultaneity between the trends; however, these different changes might be explained by local factors such as relief, vegetation and regional activities. Thus, the relationship of individual climatologic series studies with local factors is suggested in order to avoid worse consequences of climatic changes.

**Key-words:** Climatic trend. Mann-Kendall. State of Paraná.

## 1 INTRODUÇÃO

Mudança climática é uma temática bastante debatida pela sociedade tendo em vista os possíveis impactos ambientais, econômicos e sociais, advindos de sua natureza dotada de difícil previsibilidade. O estudo da variabilidade do clima se faz necessário para melhor entendimento do fenômeno e suas causas e colabora com o desafio da climatologia que consiste em prever as futuras alterações do clima e impedir os piores danos causados por elas (SILVA; GUETTER, 2003).

As oscilações do regime térmico, assim como seus efeitos sociais, são distintos em cada região do globo e podem divergir da tendência global (MINUZZI; CARAMORI; BORROZINO, 2011). Além disso, o estudo referente às condições regionais das temperaturas e sua variabilidade torna-se essencial, já que, até o momento, poucas séries climatológicas locais foram analisadas (SOUZA; AZEVEDO, 2009). Nesse sentido a distribuição espacial das temperaturas pode ser melhor estudada com o auxílio de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), onde são aplicados diferentes métodos de interpolação, como por exemplo, ponderação inversa à distância, análise de regressão, spline, krigagem, interpolação polinomial, etc (RÍO et al., 2011).

A análise regional e atual da temperatura do ar é fundamental em estudos que tem como objetivo, por exemplo, projetar futuros cenários climáticos e prever os possíveis impactos relacionados às alterações do clima. Dentre outras consequências, as alterações na temperatura do ar, que é uma variável climática que atua em diferentes processos biológicos, físicos e químicos no ecossistema natural, podem causar alterações na disponibilidade hídrica do solo podendo provocar efeitos em vários setores associados aos recursos hídricos, como, por exemplo, a agricultura, que é um dos pilares da economia do Brasil.

Segundo Moraes et al. (2011), a agricultura, dentre os setores da economia, é o que apresenta maior dependência das condições do clima, permitindo supor que qualquer mudança climática possa reproduzir algum efeito no zoneamento, na produtividade e nas técnicas de manejo desse setor.

Diante do pressuposto, algumas pesquisas têm sido realizadas com intuito de conhecer a tendência climática atual e regional. Nesses estudos testes

estatísticos de análises não-paramétricas, como por exemplo, o teste de Mann-Kendall, são utilizados para testar a significância estatística da tendência verificada nas séries de dados climáticos, como nos trabalhos realizados por Blain; Picoli e Jorge (2009), Back; Bruna e Vieira (2012) e Santos, Oliveira e Sediya (2010) no Brasil, Gocic e Trajkovic (2013) na Sérvia e Mandal et al. (2013) na Índia. O teste de Mann-Kendall é usualmente aplicado em estudos de tendência por possuir maior robustez e poder do que outros testes estatísticos (NALLEY et al., 2013).

Adicionalmente, com o objetivo de verificar a magnitude das alterações encontradas nos períodos analisados, aplica-se o método da regressão linear, onde os valores dos coeficientes angulares obtidos pela reta ajustada aos dados representam a referida magnitude. Este método foi aplicado em Minuzzi; Vianello e Sediya (2010), Minuzzi; Caramori e Borrozino (2011) e Lima; Menezes e Brito (2010). Pode-se ainda citar outros estudos que utilizaram ambos os métodos, o método de regressão linear e o método de Mann-Kendall : Streck et al. (2011), Marengo e Camargo (2008) e Sansigolo e Kayano (2010), Ríó; Penas e Fraile (2005) e Ríó et al. (2011).

Estudos realizados por Marengo e Camargo (2008) indicaram um aquecimento das temperaturas máximas e mínimas na região Sul do Brasil durante todo o ano e em nível sazonal. Porém a temperatura mínima apresentou aumentos mais acentuados em comparação aos aumentos da temperatura máxima. Resultados semelhantes foram encontrados em Minuzzi; Caramori e Borrozino (2011) para o estado do Paraná , sugerindo uma diminuição na amplitude térmica da região.

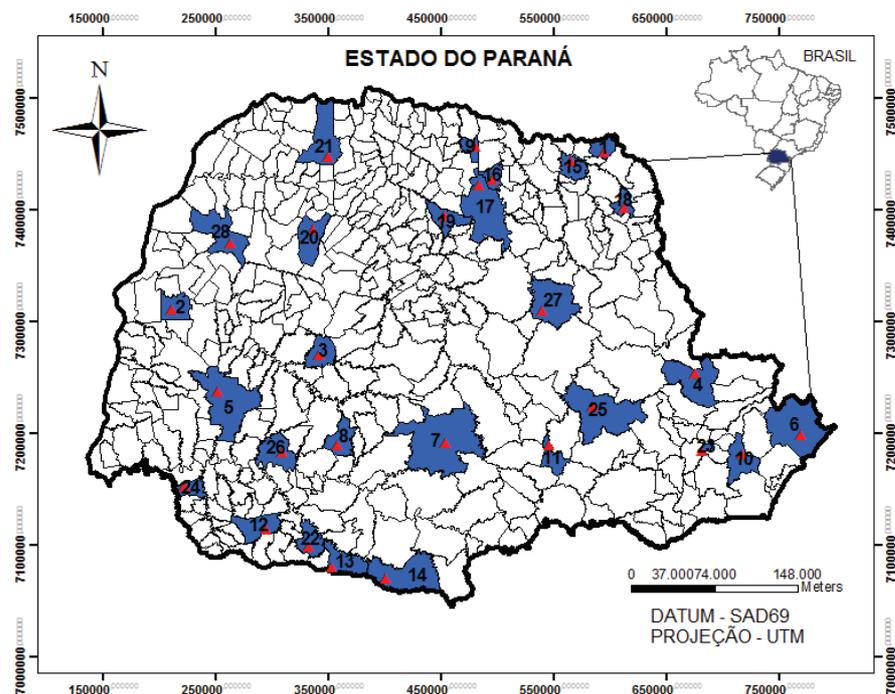
De acordo com Costa; Morais e Caramori (2012) o estado do Paraná por estar localizado em uma área de transitoriedade geográfica, possui uma grande heterogeneidade climática e uma complexa dinâmica dos fenômenos atmosféricos. Devido a esta característica particular e à necessidade de analisar séries climáticas regionais, este trabalho teve por objetivo avaliar a tendência temporal e espacial da temperatura máxima e mínima do ar do estado do Paraná, Brasil.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

O estado do Paraná pertence à região Sul do Brasil e está localizado entre as longitudes 741694.12 (54°35'37") e 799877.66 (48°01'24") e as latitudes

7509413.11 (22°31'05") e 7044796.94 (26°43'03"). Com a finalidade de conhecer a tendência da temperatura do Paraná, foram utilizados dados diários de temperatura mínima e máxima do ar de 28 localidades distribuídas no estado (Figura 2.1). Os dados das séries temporais obtidos de estações meteorológicas, representadas na Figura 2.1, compreendem o período de 1980 a 2009 e foram cedidos pelo Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR).

**Figura 2.1** - Localidades e estações meteorológicas do IAPAR distribuídas no estado do Paraná.



#### LEGENDA

▲ ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS-IAPAR

#### LOCALIDADES

1 - CAMBARA	8 - LARANJEIRAS DO SUL	15 - BANDEIRANTES	22 - PATO BRANCO
2 - PALOTINA	9 - BELA VISTA DO PARAISO	16 - IBIPORA	23 - PINHAIS
3 - NOVA CANTU	10 - MORRETES	17 - LONDRINA	24 - PLANALTO
4 - CERRO AZUL	11 - FERNANDES PINHEIRO	18 - JOAQUIM TAVORA	25 - PONTA GROSSA
5 - CASCAVEL	12 - FRANCISCO BELTRAO	19 - APUCARANAS	26 - QUEDAS DO IGUACU
6 - GUARAQUECABA	13 - CLEVELANDIA	20 - CIANORTE	27 - TELEMACO BORBA
7 - GUARAPUAVA	14 - PALMAS	21 - PARANAVAI	28 - UMUARAMA

Fonte: Elaborado pela autora. Base vetorial: IBGE 2014.

No Laboratório de Estatística Aplicada e Computacional - LECA da Universidade Estadual de Ponta Grossa, Paraná, Brasil, os dados foram organizados mensalmente em planilhas eletrônicas, onde foram calculadas as médias anuais, as quais foram representadas graficamente por diagramas de

tendência para cada mês e localidade. Aplicando a técnica de regressão linear, pôde-se estimar a magnitude das tendências, por meio da obtenção do coeficiente angular da reta ajustada aos dados.

Para a análise sazonal, considerou-se os seguintes meses como representativos para cada estação: janeiro a março (verão), abril a junho (outono), junho a setembro (inverno), outubro a dezembro (primavera).

A avaliação da significância estatística das tendências encontradas foi realizada a partir do teste não-paramétrico de Mann-Kendal (MANN, 1945, KENDALL, 1975). Segundo Yu; Yang e Wu (2002), este teste é recomendado pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM) em estudos de tendências de séries meteorológicas. Admitindo que os dados não apresentem correlação serial, os testes foram aplicados no ambiente computacional R (v.3.0.1) para cada localidade e estação do ano, onde se utilizou o pacote "Kendall" (MCLEOD, 2013). Considerando a sequência dos valores observados de temperatura, tanto máxima quanto mínima, ao longo do tempo (1980-2009), as hipóteses testadas foram "H0: Os dados são uma amostra de uma variável aleatória de n dados independentes e identicamente distribuídos", isto é, não existe tendência no conjunto de dados e H1: Existe uma tendência crescente (positiva) ou decrescente (negativa).

O teste de Mann-Kendall é expresso pela equação:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (2.1)$$

onde:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$$

Onde a estatística de S é a contagem do número de vezes em que  $x_j$  excede o seu valor subsequente  $x_k$ , para  $j > k$ , mais vezes do que  $x_k$  excede  $x_j$ . O valor D representa valor máximo possível para S e ocorre quando  $x_1 < x_2 < \dots < x_n$  (Hipel & McLeod 2005).

$$D = \left[ \frac{1}{2}n(n-1) - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^p t_j(t_j-1) \right]^{0,5} \left[ \frac{1}{2}n(n-1) \right]^{0,5} \quad (2.2)$$

A estatística do tau de Kendall (equação 3) foi utilizada para indicar o sentido da tendência, conforme foi utilizada em Christofaro e Leão (2009) e Paiva e Clake (1995) que avaliaram as tendências temporais de arsênio em uma bacia hidrográfica e tendências de precipitação pluvial na Amazônia respectivamente. Um

valor positivo de tau significa uma tendência crescente e um valor negativo, uma tendência decrescente.

$$\tau = \frac{S}{D} \quad (2.3)$$

Para a análise da tendência utilizou-se o valor p obtido pelo teste para a decisão das hipóteses. Considerando-se um nível de significância de pelo menos 0.05, ou seja, quando o valor-p é menor ou igual a 0.05, rejeita-se H0, e aceita-se H1, constatando-se assim a significância da tendência dos dados.

Com o objetivo de obter a distribuição espacial das alterações de temperatura para todo o estado do Paraná, foram elaborados mapas georreferenciados no Laboratório de Mecanização Agrícola – LAMA, UEPG, Ponta Grossa-PR, por meio do ARCGIS v.10.0, um sistema de informações geográficas (SIG), onde se utilizou o método de interpolação spline. O método de interpolação Spline corresponde ao ajuste de várias funções ao conjunto de dados disponíveis. Cria-se uma malha ou superfície flexível, que passa pelos pontos amostrais. Segundo Hartkamp et al. (1999), a utilização dessa técnica é recomendada para interpolação de variáveis climáticas, considerando a previsão dos erros, os pressupostos de dados e a simplicidade computacional. Esse método de interpolação também foi utilizado por Sentelhas; Santos e Machado (2008). Os valores interpolados foram os valores dos coeficientes angulares, representando a alteração em °C/ano.

### 3 RESULTADOS

A Tabela 2.1 apresenta os valores dos coeficientes angulares obtidos através do método de regressão, os quais representam a magnitude das alterações encontradas no período analisado. O estado do Paraná apresentou uma grande variabilidade nas alterações de temperatura entre os municípios analisados. Os resultados da regressão demonstram que, em relação à temperatura mínima, as alterações no período de 1980 a 2009 variaram de -0,049°C/ano para o município de Palotina na estação de outono a 0,038°C/ano para os municípios de Palmas e Paranavaí no inverno. Já em relação à temperatura máxima, as alterações variaram de -0,036°C/ano a 0,061°C/ano, para os municípios de Joaquim Távora (verão) e

Umuarama (inverno e primavera) respectivamente. Em uma análise sazonal generalizada, observa-se que as alterações encontradas na temperatura mínima, variaram de -0,024 a 0,020 no verão, de -0,049 a 0,023 para o outono, de -0,013 a 0,038 no inverno e de -0,014 a 0,035 na primavera. A temperatura máxima demonstrou uma variação nas alterações de -0,036 a 0,047 no verão, de -0,024 a 0,057 no outono, de -0,005 a 0,061 no inverno e de -0,014 a 0,061 na primavera.

De forma geral, entre as localidades analisadas foram observadas reduções de 0,5 a aumentos de 0,6 °C/ década, apresentando variações semelhantes para as estações do ano. Marengo e Camargo (2008) em estudos de tendência de temperaturas no período de 1960 a 2002 no sul do Brasil, em uma análise anual encontraram aumento de 0,5°C por década para temperatura mínima e 0,2°C por década para temperatura máxima.

A divergência entre as alterações encontradas neste trabalho pode ser explicada pelo fato que o estado analisado, devido a sua posição geográfica, sofre diversas influências de fatores como tipo de clima, formação geológica, relevo, altitude e vegetação.

**Tabela 2.1** - Valores dos coeficientes angulares de regressão para cada localidade e estação do ano das variáveis temperatura máxima e temperatura mínima.

CIDADES	COEFICIENTES ANGULARES							
	VERÃO		OUTONO		INVERNO		PRIMAVERA	
	T. Mín.	T.Máx.	T. Mín.	T.Máx.	T. Mín.	T.Máx.	T. Mín.	T.Máx.
APUCARANA	0,005	-0,011	-0,015	0,010	0,002	0,004	-0,001	-0,011
BANDEIRANTES	0,016	0,007	0,003	0,031	0,023	0,034	0,013	0,021
BELA VISTA DO PARAÍSO	0,009	0,004	0,005	0,028	0,029	0,037	0,006	0,022
CAMBARÁ	0,011	-0,010	-0,009	0,016	0,012	0,025	0,013	0,018
CASCAVEL	0,001	-0,002	-0,014	-0,002	-0,001	0,001	0,002	0,008
CERRO AZUL	0,002	-0,013	-0,015	0,007	0,000	-0,004	0,001	-0,002
CIANORTE	0,009	0,005	-0,004	0,009	0,004	0,016	-0,001	-0,001
CLEVELÂNDIA	-0,004	0,018	0,003	0,016	0,019	0,018	0,011	0,028
FERNANDES PINHEIRO	0,008	0,019	0,005	0,030	0,025	0,034	0,013	0,019
FRANCISCO BELTRÃO	-0,007	0,023	-0,005	-0,024	0,000	0,006	0,003	0,027
GUARAPUAVA	0,011	-0,011	-0,010	0,005	0,015	0,012	0,034	0,012
GUARAQUEÇABA	0,001	-0,006	-0,001	0,001	0,033	0,011	0,011	-0,006
IBIPORÃ	0,015	-0,007	0,004	0,026	0,029	0,029	0,011	0,016
JOAQUIM TÁVORA	-0,001	-0,036	-0,027	-0,010	0,013	0,005	0,008	-0,011
LARANJEIRAS DO SUL	0,012	-0,001	0,011	0,003	0,036	0,028	0,013	0,011
LONDRINA	0,018	0,020	0,005	0,040	0,022	0,040	0,024	0,029
MORRETES	0,008	0,008	0,013	0,006	0,034	0,020	0,022	0,004
NOVA CANTÚ	0,007	-0,006	0,005	-0,018	0,032	0,000	0,025	0,020
PALMAS	0,020	-0,014	0,023	-0,001	0,038	0,014	0,035	0,002
PALOTINA	-0,004	0,011	-0,049	0,011	-0,010	0,034	0,015	0,027
PARANAÍ	0,012	-0,003	0,008	0,015	0,038	0,029	0,007	0,012
PATO BRANCO	0,010	0,001	0,013	0,003	0,021	0,007	0,032	0,033
PINHAIS	-0,011	-0,001	-0,030	-0,007	-0,007	0,010	-0,012	0,015
PLANALTO	-0,024	-0,004	-0,018	0,001	-0,013	0,005	-0,006	0,014
PONTA GROSSA	-0,010	0,010	-0,046	0,003	-0,009	0,025	-0,014	0,009
QUEDAS DO IGUAÇÚ	-0,004	-0,005	-0,044	-0,011	-0,011	-0,005	-0,009	-0,014
TELÊMACO BORBA	0,019	0,014	0,001	0,027	0,035	0,040	0,025	0,029
UMUARAMA	0,015	0,047	0,018	0,057	0,033	0,061	0,021	0,061

A Tabela 2.2 demonstra os valores de tau e os valores- p obtidos pelo teste de Mann-Kendall para a variável temperatura máxima. Analisando o sinal de tau, observa-se que 18 municípios apresentaram tendência negativa na temperatura máxima em pelo menos uma das estações do ano e 27 municípios apresentaram tendência positiva nessa mesma variável em pelo menos uma das estações do ano.

Em termos gerais a maioria dos municípios apresentou tendência positiva na temperatura máxima, porém isso ficou mais evidente nas estações de inverno e primavera. Os municípios que apresentaram tendência positiva significativa foram

Londrina no verão, Telêmaco Borba na primavera e Umuarama nas estações verão, inverno e primavera. Minuzzi; Caramori e Borrozino (2011) também observaram que o município de Umuarama apresentou tendência significativa positiva, porém em todas as estações do ano. Segundo França Junior e Villa (2013) desde a metade do século XX, o município de Umuarama assim como outras localidades da região Noroeste Paranaense vem passando por um rápido e desorganizado crescimento demográfico. A expansão da área urbana pode ser responsável pelo aumento da temperatura local, explicando assim o resultado encontrado neste estudo.

Em relação à temperatura máxima, apenas o Município de Joaquim Távora apresentou tendência negativa significativa no verão. Resultado semelhante foi observado em Minuzzi; Caramori e Borrozino (2011), onde esse mesmo município apresentou tendência significativa negativa também na estação verão.

Apesar da maioria dos municípios apresentarem tendência positiva na temperatura máxima, observa-se que poucas localidades apresentaram tendência significativa positiva. Resultado semelhante foi observado em Blain (2010) que ao analisar as tendências climáticas em oito séries de temperatura máxima média anual do estado de São Paulo, apenas os municípios de Piracicaba e Campinas apresentaram o teste Mann-Kendall significativo no período de 1917/2007, indicando tendência de elevação.

**Tabela 2.2** - Teste de Mann-Kendall para a variável temperatura máxima para as localidades e estações do ano.

CIDADES	TESTE DE MANN-KENDALL - TEMPERATURA MÁXIMA							
	VERÃO		OUTONO		INVERNO		PRIMAVERA	
	Tau	p-value	tau	p-value	tau	p-value	tau	p-value
APUCARANA	-0,071	0,592	0,071	0,592	-0,030	0,830	-0,108	0,412
BANDEIRANTES	0,136	0,301	0,186	0,154	0,140	0,284	0,200	0,125
BELA VISTA DO PARAÍSO	0,103	0,432	0,131	0,318	0,145	0,269	0,186	0,154
CAMBARÁ	-0,044	0,748	0,044	0,748	0,136	0,301	0,191	0,143
CASCAVEL	-0,048	0,721	-0,159	0,225	-0,053	0,695	0,053	0,695
CERRO AZUL	-0,058	0,669	0,007	0,972	-0,039	0,775	0,076	0,568
CIANORTE	0,076	0,568	0,016	0,915	0,025	0,858	0,012	0,943
CLEVELÂNDIA	0,182	0,164	0,053	0,695	0,071	0,592	0,218	0,094
FERNANDES PINHEIRO	0,172	0,187	0,159	0,225	0,177	0,175	0,149	0,254
FRANCISCO BELTRÃO	0,237	0,069	-0,218	0,094	0,035	0,803	0,191	0,143
GUARAPUAVA	-0,062	0,643	0,002	1,000	0,058	0,669	0,145	0,269
GUARAQUEÇABA	-0,035	0,803	-0,021	0,887	0,039	0,775	-0,007	0,972
IBIPORÃ	0,090	0,498	0,090	0,498	0,126	0,335	0,177	0,175
JOAQUIM TÁVORA	-0,255	0,050*	-0,122	0,354	0,016	0,915	-0,044	0,748
LARANJEIRAS DO SUL	0,039	0,775	-0,025	0,858	0,168	0,199	0,076	0,568
LONDRINA	0,251	0,054*	0,195	0,134	0,200	0,125	0,237	0,069
MORRETES	0,035	0,803	-0,035	0,803	0,090	0,498	0,039	0,775
NOVA CANTÚ	-0,053	0,695	-0,177	0,175	-0,016	0,915	0,232	0,074
PALMAS	-0,149	0,254	-0,062	0,643	0,103	0,432	0,048	0,721
PALOTINA	0,108	0,412	-0,007	0,972	0,154	0,239	0,218	0,094
PARANAÍ	0,030	0,830	0,053	0,695	0,131	0,318	0,149	0,254
PATO BRANCO	0,012	0,943	-0,025	0,858	0,025	0,858	0,246	0,059
PINHAIS	-0,012	0,943	-0,058	0,669	0,058	0,669	0,159	0,225
PLANALTO	-0,016	0,915	-0,048	0,721	0,021	0,887	0,214	0,101
PONTA GROSSA	0,209	0,108	-0,053	0,695	0,122	0,354	0,126	0,335
QUEDAS DO IGUAÇÚ	-0,016	0,915	-0,149	0,254	-0,044	0,748	-0,067	0,617
TELÊMACO BORBA	0,172	0,187	0,154	0,239	0,209	0,108	0,264	0,042*
UMUARAMA	0,384	0,003**	0,232	0,074	0,269	0,038*	0,471	0,000**

\*\* p<0,01; \* p<0,05.

Em termos gerais, a maioria dos municípios apresentou tendência positiva na temperatura mínima nas estações do ano, exceto no outono, período em que a maioria dos municípios apresentou tendência negativa (Tabela 2.3). Observa-se que 19 municípios apresentaram tendência negativa na temperatura mínima em pelo menos umas das estações do ano e 25 municípios apresentaram tendência positiva nessa variável em pelo menos uma das estações do ano, sendo que os municípios

de Pinhais, Ponta Grossa e Quedas do Iguaçu apresentaram tendência negativa em todas as estações do ano.

Em relação à temperatura mínima, apenas o município de Planalto apresentou tendência negativa significativa no verão e os municípios de Palotina, Pinhais, Ponta Grossa e Quedas do Iguaçu no outono. Os municípios que apresentaram tendência positiva significativa foram Londrina e Bandeirantes no verão, Bela Vista do Paraíso, Guaraqueçaba, Morretes e Paranavaí no inverno e Guarapuava, Londrina, Palmas, Pato Branco e Telêmaco Borba na estação da primavera. Blain; Picoli e Jorge (2009) encontraram tendências significativas de aumento na temperatura mínima em três localidades do estado de São Paulo (Campinas, Cordeirópolis/Limeira e Ribeirão Preto). As demais séries de temperatura mínima anuais analisadas (Monte Alegre do Sul, Pindorama e Piracicaba) não apresentaram aumento significativo.

O aumento significativo na temperatura mínima nas localidades já citadas pode ser consequência do desmatamento e ocupação com atividades agrícolas. De acordo com Gasparotto; Caramori e Vasconcellos (2005) a maior exposição do solo aumenta o calor armazenado durante o dia, e pode elevar as temperaturas mínimas, durante a noite.

Pode-se observar também que houve mais municípios que apresentaram tendência positiva significativa na temperatura mínima do que na temperatura máxima. Resultado diferente foi obtido por Minuzzi; Caramori e Borrozino (2011), que observaram um número relativamente maior de tendências significativas da temperatura máxima.

**Tabela 2.3** - Teste de Mann-Kendall para a variável temperatura mínima para as localidades e estações do ano.

CIDADES	TESTE DE MANN-KENDALL - TEMPERATURA MÍNIMA							
	VERÃO		OUTONO		INVERNO		PRIMAVERA	
	tau	p-value	tau	p-value	tau	p-value	tau	p-value
APUCARANA	0,062	0,643	-0,241	0,064	0,021	0,887	-0,002	1,000
BANDEIRANTES	0,260	0,046*	-0,058	0,669	0,195	0,134	0,108	0,412
BELA VISTA DO PARAÍSO	0,159	0,225	0,012	0,943	0,274	0,035*	0,062	0,643
CAMBARÁ	0,182	0,164	-0,090	0,498	0,076	0,568	0,058	0,669
CASCAVEL	0,048	0,721	-0,223	0,087	0,035	0,803	0,062	0,643
CERRO AZUL	-0,002	1,000	-0,154	0,239	0,012	0,943	-0,030	0,830
CIANORTE	0,159	0,225	-0,025	0,858	0,002	1,000	-0,025	0,858
CLEVELÂNDIA	0,025	0,858	-0,016	0,915	0,145	0,269	0,126	0,335
FERNANDES PINHEIRO	0,145	0,269	-0,021	0,887	0,195	0,134	0,140	0,284
FRANCISCO BELTRÃO	-0,067	0,617	-0,071	0,592	0,030	0,830	0,058	0,669
GUARAPUAVA	0,117	0,372	-0,108	0,412	0,103	0,432	0,297	0,022*
GUARAQUEÇABA	0,048	0,721	-0,062	0,643	0,324	0,012*	0,076	0,568
IBIPORÃ	0,223	0,087	-0,021	0,887	0,246	0,059	0,099	0,454
JOAQUIM TÁVORA	-0,007	0,972	-0,232	0,074	0,062	0,643	0,090	0,498
LARANJEIRAS DO SUL	0,145	0,269	0,021	0,887	0,241	0,064	0,140	0,284
LONDRINA	0,274	0,035*	0,025	0,858	0,182	0,164	0,251	0,054*
MORRETES	0,094	0,475	0,053	0,695	0,315	0,015*	0,214	0,101
NOVA CANTÚ	0,159	0,225	-0,058	0,669	0,223	0,087	0,241	0,064
PALMAS	0,232	0,074	0,149	0,254	0,218	0,094	0,283	0,030*
PALOTINA	0,016	0,915	-0,352	0,007**	-0,039	0,775	0,025	0,858
PARANAÍ	0,195	0,134	0,007	0,972	0,251	0,054*	0,081	0,544
PATO BRANCO	0,172	0,187	0,030	0,830	0,145	0,269	0,287	0,027*
PINHAIS	-0,205	0,116	-0,329	0,011*	-0,085	0,521	-0,168	0,199
PLANALTO	-0,343	0,008**	-0,200	0,125	-0,071	0,592	0,002	1,000
PONTA GROSSA	-0,177	0,175	-0,343	0,008**	-0,090	0,498	-0,117	0,372
QUEDAS DO IGUAÇÚ	-0,016	0,915	-0,398	0,002**	-0,035	0,803	-0,048	0,721
TELÊMACO BORBA	0,182	0,164	0,021	0,887	0,154	0,239	0,251	0,054*
UMUARAMA	0,218	0,094	0,058	0,669	0,228	0,080	0,223	0,087

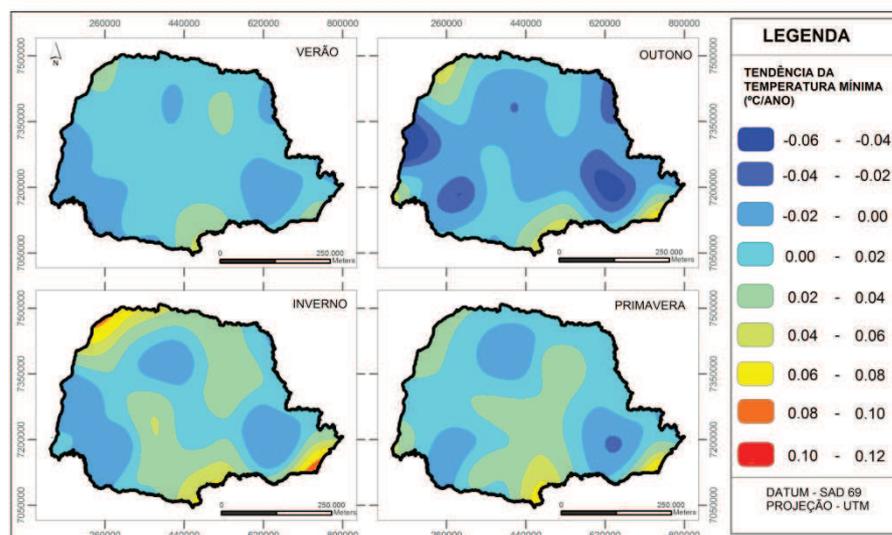
\*\* p<0,01; \* p<0,05.

As Figuras 2.2 e 2.3 representam a interpolação dos dados de coeficientes angulares para o estado do Paraná. De maneira geral as alterações encontradas variaram de -0,06 a 0,12°C/ano, tanto para temperatura mínima quanto para a temperatura máxima.

Observa-se que para a temperatura mínima e na estação verão, a maior parte do estado apresenta uma variação de 0,00 a 0,02°C/ano, demonstrando assim uma estabilidade da variável no período de 1980 a 2009. Nas estações inverno e

primavera observa-se que algumas regiões (centro e sul do estado) apresentaram um discreto aumento, de 0,02 a 0,04°C/ano e maior aumento nas regiões noroeste, extremo sul e também no litoral. A estação outono apresentou reduções na variável também em grande parte do estado. No entanto observa-se que nas quatro estações do ano alguns pontos do estado merecem destaque por apresentar visíveis reduções na temperatura mínima. Esse fato demonstra que há fatores locais que podem ser responsáveis pela redução na temperatura. Blain; Picoli e Jorge (2009) sugerem uma análise de fatores locais, sendo assim a estabilidade na temperatura ou mesmo uma discreta redução pode estar relacionada a locais que ainda possuem área de mata nativa ou campo natural, como é caso da Região dos Campos Gerais que abrange os municípios de Telêmaco Borba e Ponta Grossa.

**Figura 2.2** - Mapa do estado do Paraná representando as alterações de temperatura mínima (°C/ano).

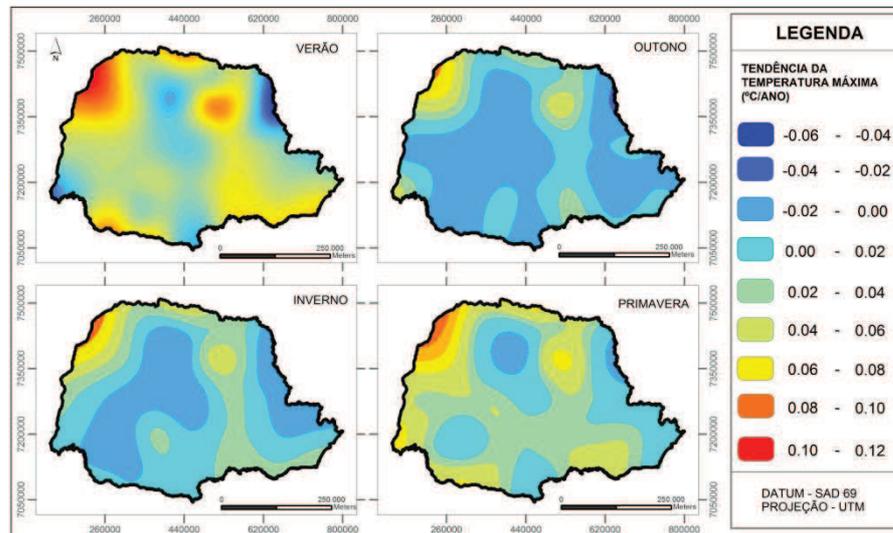


Fonte: Elaborado por Eliane Nascimento dos Santos e Gabriela Leite Neves. Base vetorial: IBGE 2014.

Pode-se observar que para a temperatura máxima a estação verão apresentou alterações de aumento distribuídas por todo o estado do Paraná. O outono, assim como para temperatura mínima, apresentou valores de redução na temperatura em vários municípios distribuídos pelo Estado. Resultado semelhante foi observado por Blain; Picoli e Jorge (2009) no estado de São Paulo, onde alguns municípios apresentaram tendência negativa ou estabilidade nas séries de dados. Diferentemente da temperatura mínima, as manchas com redução de temperatura

não ficaram evidenciadas, portanto foram observadas manchas de aumento mais acentuados na região noroeste do Paraná, principalmente no verão.

**Figura 2.3** - Mapa do estado do Paraná representando as alterações de temperatura máxima (°C/ano).



Fonte: Elaborado por Eliane Nascimento dos Santos e Gabriela Leite Neves. Base vetorial: IBGE 2014.

#### 4 CONCLUSÕES

Pode-se concluir, por meio dos resultados obtidos de cada localidade e também da interpolação, que a temperatura mínima apresentou aumento principalmente no inverno e primavera. Portanto, ressalta-se que houve reduções consideráveis no estado do Paraná, na estação de outono. Em relação à temperatura máxima as reduções foram observadas também no outono e os aumentos no inverno e primavera. Esses aumentos foram mais acentuados no verão principalmente na região noroeste.

Não foi possível definir uma simultaneidade entre as tendências, já que as alterações variaram desde redução a aumento na temperatura, e poucos municípios apresentaram tendência significativa. Essas diferentes alterações encontradas na temperatura são explicadas pelos fatores locais, como relevo e vegetação ou até por atividades causadas pelo homem, como desmatamento, que podem ser responsáveis por manter a temperatura estável ou pelo aumento da temperatura do ar.

As diversas alterações encontradas devem ser consideradas nos questionamentos das mudanças climáticas, já que indicam vulnerabilidade no clima e sugerem alguma alteração local, seja natural ou antropogênica. Sendo assim, destaca-se a importância de estudos de séries individuais e sua relação com os fatores locais para que as piores consequências das mudanças climáticas possam ser evitadas.

### CAPÍTULO III

## SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS E O IMPACTO NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA DO ESTADO DO PARANÁ

### RESUMO

O impacto das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica vem sendo observado por alguns pesquisadores e tem sido foco de muitos estudos. Diante da importância dos recursos hídricos para toda a sociedade, o conhecimento da futura condição hídrica frente às prováveis mudanças do clima se torna necessário. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo simular cenários climáticos futuros e avaliar o impacto no balanço hídrico do solo no estado do Paraná. Utilizou-se dados diários de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima correspondentes a uma série de 30 anos (1980 -2009) de 28 localidades distribuídas no Paraná. Para a simulação dos dados, utilizou-se o gerador estocástico PGECLIMA\_R e se considerou dois cenários do quinto relatório do IPCC e um cenário com a tendência dos dados históricos. As estimativas do balanço hídrico foram realizadas para os dados atuais e para os simulados, pela metodologia de Thornthwaite e Mather (1955). A fim de obter a espacialização dos resultados encontrados, utilizou-se a ferramenta de interpolação krigagem para interpolar os valores de índices hídricos, valor que foi escolhido como parâmetro para representar as condições hídricas nas diferentes situações analisadas. O estado do Paraná apresentou uma grande variabilidade na disponibilidade hídrica entre as regiões analisadas, porém não apresentou valores elevados de deficiência hídrica, mesmo frente às mudanças climáticas. De um modo geral, observou-se uma redução dos índices hídricos na maioria das regiões e em todos os cenários avaliados, de forma, que a região norte mostrou uma redução mais visível comparadas às outras regiões. O segundo cenário do IPCC foi responsável por causar maiores reduções e condições mais secas para o ano 2099.

**Palavras-chave:** Índice hídrico. Krigagem. Estado do Paraná. PGECLIMA\_R.

## ABSTRACT

The impact of climate change on water availability has been observed by some researchers and has been the focus of many studies. Given the importance of water resources for all the society, the knowledge of future water status under likely climate changes becomes necessary. Thus, this study aimed to simulate future climate scenarios and to assess the impact on soil water balance in the state of Paraná, Brazil. It was used daily precipitation data, maximum air temperature and minimum air temperature, corresponding to a series of 30 years (1980 -2009) for 28 location distributed in Parana. The stochastic generator PGECLIMA\_R was used for the simulation of the data, considering two scenarios presented in the fifth report of IPCC and a scenario with the trends of the historical data. Estimates of the water balance were made to the current and simulated data, using the methodology of Thornthwaite and Mather (1955). In order to obtain the spatial distribution of the results, the kriging interpolation tool was used to interpolate the values of water levels, an amount that was chosen as a parameter to represent the water conditions in different situations analyzed. The state of Paraná has a wide variability in water availability between regions analyzed, but did not show high levels of water stress, even in the face of climate change. But in general, there was a reduction of water levels in most regions and in all scenarios evaluated. The northern region showed a more marked reduction compared to other regions. The second scenario of the IPCC was responsible for causing further reductions and drier conditions for the year 2099.

**Keywords:** Water level. Kriging. Parana state. PGECLIMA\_R.

## 1 INTRODUÇÃO

O impacto das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica tem despertado muitas incertezas e por isso tem sido o foco de muitos estudos atuais. Segundo Marengo (2008) a avaliação de futuros cenários envolvendo a alteração do clima e seu impacto nos recursos hídricos é de suma importância para o planejamento e gerenciamento deste recurso natural.

Várias pesquisas envolvendo a simulação de cenários climáticos futuros, utilizam geradores estocásticos, os quais podem gerar séries climáticas semelhantes aos padrões estatísticos dos dados históricos. Dentre estes geradores de clima, pode-se citar o CLIGEN (NICKS; HARP, 1980), o WGEN (RICHARDSON; WRIGHT, 1984), o LARS-WG (SEMENOV; BARROW, 1997), sendo que no Brasil destacam-se o GEPAC (VIRGENS FILHO, 1997), o SEDAC\_R (VIRGENS FILHO, 2001), o CLIMABR (OLIVEIRA; ZANETTI; PRUSKI, 2005) e mais recentemente o PGECLIMA\_R (VIRGENS FILHO et al., 2013).

Para as mudanças no cenário, os pesquisadores projetam alterações nas variáveis climáticas com base nos resultados gerados por modelos climáticos globais (GCMs), os quais fornecem informações sobre as mudanças climáticas em escala continental. O quinto relatório do Intergovernamental Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2013) que utiliza esses modelos, sugere como melhor cenário um aumento da temperatura de 0,3 a 1,7°C e como pior cenário um aumento de 2,6 a 4,8°C até o ano de 2100. Estes cenários se baseiam nas emissões dos gases de efeito estufa em conjunto com fatores socioeconômicos, mudanças na tecnologia e a adoção ou não de uma política de desenvolvimento sustentável. Além de se utilizar as projeções do IPCC, outra maneira de se projetar cenários futuros é considerando a tendência de dados de temperatura em um determinado período em locais específicos, a fim de analisar as variações climáticas regionais e projetar as mesmas para o futuro.

O impacto das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica pode ser avaliado e quantificado por meio da aplicação do balanço hídrico do solo, para as condições climáticas atuais e futuras. O balanço hídrico climatológico proposto por Thornthwaite e Mather (1955) é uma das metodologias usadas para contabilizar o balanço de água do solo. Considerando os componentes de entrada e saída do sistema, ou seja, os dados de precipitação (PREC) e evapotranspiração potencial

(ETP), respectivamente, é possível, desde que se conheça a capacidade de água disponível (CAD), estimar os valores de disponibilidade de água no solo (Armazenamento = ARM), da alteração do armazenamento de água do solo ( $ALT = \Delta ARM$ ), de evapotranspiração real (ETR), de deficiência hídrica (DEF) e de excedente hídrico (EXC). A evapotranspiração potencial, que representa a principal saída de água do sistema solo, pode ser estimada pelo Método de Thornthwaite (1948), que tem como variáveis de entrada apenas a temperatura média e as coordenadas geográficas.

Adicionalmente, com base no balanço hídrico, os índices climáticos (índice de aridez -  $I_a$ , índice de umidade -  $I_u$  e índice hídrico -  $I_h$ ) podem ser definidos para caracterizar o regime hídrico de uma região, seguindo a metodologia de Thornthwaite (1948). Assim os valores dos índices hídricos podem representar as condições da disponibilidade de água em um determinado local.

Diante da importância dos recursos hídricos para o desenvolvimento de diversos setores econômicos, e também para o desenvolvimento social e ambiental, o estudo local da disponibilidade hídrica frente às mudanças climáticas se torna necessário. Sendo assim, a distribuição espacial desse tipo de análise é importante e pode ser realizada com a utilização de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), nos quais são aplicadas as técnicas de interpolação, como por exemplo, krigagem, ponderação inversa à distância (IDW) e spline (Río et al., 2011). Segundo Gardiman Junior et al. (2012) e Silva et al. (2011) a técnica de krigagem ordinária apresenta resultados mais eficazes na interpolação de variáveis hidrológicas. Castro et al (2010) analisando o desempenho de diferentes interpoladores para espacialização dos componentes do balanço hídrico, também atestam que o método da krigagem é o mais eficiente.

Alguns trabalhos foram realizados com o objetivo de avaliar o impacto das mudanças climáticas no balanço hídrico. McCabe et al. (1992) analisaram os efeitos das mudanças de longo prazo no clima sobre o índice de hídrico de Thornthwaite na bacia do Rio Delaware. Os resultados do estudo indicaram que as alterações na temperatura e precipitação farão o índice hídrico de Thornthwaite a diminuir, o que implica condições significativamente mais secas na bacia do Rio Delaware.

Garcia (2010) analisou o balanço hídrico atual do município de Ituverava-SP e o futuro balanço hídrico com dados simulados de mudanças climáticas, baseados nos cenários A2 e B2 do quarto relatório do IPCC, respectivamente o mais

pessimista e o mais otimista. Os autores concluíram que embora haja um aumento no total de precipitação durante o verão, o aumento da temperatura provocará um aumento na demanda hídrica, ou seja, nos valores de evapotranspiração, que não conseguirão ser supridos com a precipitação ocorrida, o que pode ocasionar um aumento no déficit hídrico.

Segundo estudo realizado por Salati (2004), um aumento de 15% na precipitação anual e um aumento de temperatura de 2 °C, 4 °C e 6 °C previsto para as décadas de 2020, 2050 e 2080, respectivamente, podem ser responsáveis por impactos mais graves no balanço hídrico das regiões de Piracicaba, Cuiabá e Campo Grande, onde um aumento de 2°C, sobre a média de 1961-1990, poderia reduzir em aproximadamente 50% o excedente dos recursos hídricos. Já nas regiões do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, este impacto é menos sensível. No entanto, o autor conclui neste estudo que de qualquer forma, o aumento na temperatura altera o balanço hídrico reduzindo a disponibilidade hídrica.

Com o objetivo de analisar os efeitos das mudanças climáticas globais sobre os recursos hídricos, Salati et al. (2007) utilizando as médias de cinco modelos do IPCC para os cenários analisados A2 e B2 do quarto relatório do IPCC, concluíram que pode haver uma diminuição de até 70 % do excesso de água na região da Bacia do Prata, na qual o estado do Paraná está incluído, para o período de 2011 a 2040 e não haverá nenhum excesso de água para o período de 2041 a 2100, quando comparados com os dados do balanço hídrico para o período de 1961 a 1990, que apresentou excesso de água praticamente em todo o ano.

Estudos realizados em outras regiões do Brasil, como uma região do Distrito Federal e o município de Taubaté, SP, com o mesmo objetivo de avaliar o impacto das mudanças climáticas no balanço hídrico do solo também obtiveram resultados de redução do excedente hídrico frente às projeções do quarto relatório do IPCC (SANTOS, 2011; HORIKOSHI; FISCH, 2007).

O impacto das mudanças climáticas no balanço hídrico atinge todos os setores econômicos, com destaque para agricultura. Muitos trabalhos indicam que esses impactos podem ser responsáveis por modificar o zoneamento agrícola. Assad et al. (2004) demonstraram que haverá um deslocamento da área produtiva de café para a região Sul e uma redução de área apta para a cultura de 75% no estado do Paraná, no caso de um aumento na temperatura de 5,8°C.

Conforme Pereira; Villa Nova e Sediya (1997), devido à circunstância, de que as mudanças climáticas poderão afetar o zoneamento agrícola, o monitoramento hidrológico e amplo para as mesorregiões se torna necessário, a fim de fornecer informações importantes para o planejamento de consumo de água.

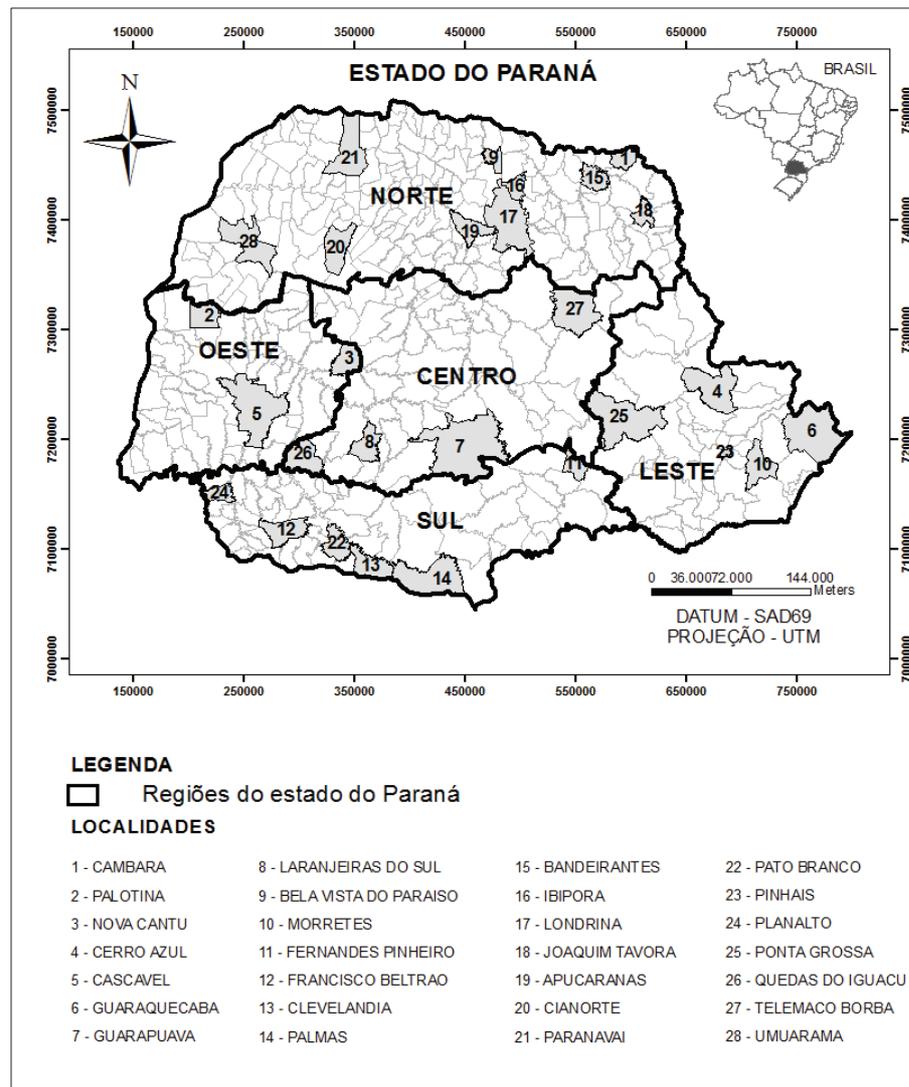
Tendo em vista o gerenciamento dos recursos hídricos para utilização nas atividades socioeconômicas que impactam diretamente no cotidiano da sociedade brasileira em geral, este trabalho teve como objetivo avaliar por meio da simulação computacional os possíveis impactos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica do solo no estado do Paraná, utilizando para tanto as estimativas do índice hídrico como parâmetro de comparação entre as condições analisadas, que abrangem cenários climáticos simulados, projetados para o final do século XXI.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

O Estado do Paraná está situado na região sul do Brasil e segundo o IBGE possui uma área de 199.307,922 km<sup>2</sup>. Conforme a classificação de Koppen o estado do Paraná possui dois tipos climáticos: Cfa - Clima subtropical com temperatura média no mês mais frio inferior a 18 °C (mesotérmico) e temperatura média no mês mais quente acima de 22 °C, com verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida e Cfb - Clima temperado propriamente dito com temperatura média no mês mais frio abaixo de 18 °C (mesotérmico), com verões frescos, temperatura média no mês mais quente abaixo de 22 °C e sem estação seca definida (IAPAR, 2014).

Para a realização deste trabalho utilizou-se dados de precipitação pluvial (PREC), temperatura mínima (TMIN) e temperatura máxima (TMAX), correspondentes a uma série histórica de 1980 a 2009. Os dados foram cedidos pelo Instituto Agrônomo do Paraná-IAPAR, os quais foram coletados em estações convencionais de 28 localidades do estado do Paraná (Figura 3.1). O mapa do Estado avaliado foi dividido em cinco regiões (norte, sul, leste, oeste e centro) criadas apenas para facilitar a discussão dos resultados encontrados.

**Figura 3.1** – Regiões e localidades analisadas, distribuídas no estado do Paraná.



Fonte: Elaborado pela autora. Base vetorial: IBGE 2014.

Com o propósito de avaliar os impactos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica do Paraná, foram considerados três cenários climáticos futuros, cada um com suas respectivas alterações nas variáveis climáticas. Para o primeiro e segundo cenário a alteração na temperatura foi baseada das projeções do quinto relatório do IPCC (IPCC, 2013), sendo que foi considerado o valor superior do intervalo proposto da alteração. Assim, no melhor cenário, projetou-se um aumento na temperatura de 1,7°C, e no pior cenário um incremento de 4,8 °C. No terceiro cenário projetou-se uma alteração na temperatura seguindo a tendência dessa variável, encontrada em cada uma das localidades do estado do Paraná para o período de 1980 a 2009. Para estimar a magnitude dessas tendências, aplicou-se a

técnica de regressão linear onde o coeficiente angular foi multiplicado por 90, representando a alteração projetada para 90 anos. Neste cenário se considerou que as tendências das variações ocorridas no período de 1980 a 2009 continuarão a ocorrer para os próximos 90 anos. As alterações tanto para temperatura mínima quanto para temperatura máxima foram projetadas para cada localidade e mês do ano.

Para a alteração na PREC, considerou-se um aumento de 3 % para cada 1 °C no primeiro cenário e um aumento de 5% para cada 1°C no segundo cenário. Para o cenário da tendência as projeções foram calculadas para cada mês e localidade. Considerando que segundo a tendência há aumento ou redução na temperatura, dependendo da localidade e do mês em questão, optou-se por projetar na simulação um aumento de 4 % na PREC para cada variação de 1°C.

As séries foram simuladas para um período de 90 anos, por meio do gerador PGECLIMA\_R (Virgens Filho et al., 2013). Os dados diários foram organizados em planilhas eletrônicas onde as variáveis PREC, TMIN E TMAX das séries históricas e simuladas foram separadas mensalmente. Com o intuito de analisar o impacto das alterações climáticas no final de cada período de 30 anos utilizou-se as médias mensais dos anos 2039, 2069 e 2099. Obteve-se a média de três simulações realizadas para cada período das variáveis climáticas. A partir das médias mensais simuladas de cada localidade, de cada cenário e de cada ano procederam-se os cálculos dos balanços hídricos.

Segundo Pereira; Angelocci e Sentelhas (2007) quando a estimativa do balanço hídrico (BH) é utilizada para fins de caracterização da disponibilidade hídrica de uma região, a escolha do valor de CAD é feita mais em função do tipo de cultura ao qual futuramente pretende-se aplicar o BH, do que do tipo de solo. Assim, independentemente do tipo de solo, pode-se adotar valores de CAD entre 75 e 100mm, para culturas anuais e entre 100 a 125mm, para culturas perenes. Sendo assim adotou-se para este trabalho o valor de CAD=100, já que esse valor pode ser selecionado para os dois tipos de cultura.

A ETP foi estimada pelo método de Thornthwaite (1948) e o balanço hídrico pelo método de Thornthwaite e Mather (1955). Para a elaboração dos BH's foram utilizadas as planilhas do Excel nos programas "BHnorm61" e "BHseq64" elaborado por Rolim; Sentelhas e Barbieri (1998). Para as séries históricas calculou-se o BH normal, o qual indica a disponibilidade hídrica na região ao longo de um ano médio

(cíclico). Para os dados simulados calculou-se o BH sequencial em escala mensal, a fim de fornecer a disponibilidade hídrica em tempo efetivo, ou seja, dos anos 2039, 2069 e 2099.

Os índices  $I$  e  $a$  utilizados na estimativa da ETP, os quais representam os índices térmicos de uma região, foram calculados por meio dos valores de temperatura de cada ano e cenário específico, já que se supõe que haverá uma modificação no ritmo da temperatura para as condições futuras.

Obtidos os valores de EXC, DEF e ETP por meio do BH, calculou-se os índices climáticos segundo a classificação de Thornthwaite (1948), considerando-se as seguintes equações:

$$I_a = 100 \cdot (DEF / ETP) \quad (3.1)$$

$$I_u = 100 \cdot (EXC / ETP) \quad (3.2)$$

$$I_h = I_u - 0,6 \cdot I_a \quad (3.3)$$

O  $I_a$ , representa o índice de aridez que indica a escassez hídrica expressa em porcentagem em função da deficiência hídrica (DEF) e da evapotranspiração potencial (ETP), ambas anuais.

O índice de umidade ( $I_u$ ) representa o excedente hídrico expresso em porcentagem em função do excesso hídrico (EXC) e da evapotranspiração potencial (ETP), ambos anuais e o  $I_h$  (índice hídrico), que representa os períodos de excesso e falta de água que ocorrem ao longo do ano. O  $I_h$  também designado em outros trabalhos como índice de umidade índice de umidade efetiva ( $I_m$ ).

Com o objetivo de espacializar os resultados obtidos para todo o estado do Paraná, utilizou-se a ferramenta de interpolação krigagem ordinária através do software ARCGIS v.10.2.1, onde utilizou-se a variável do  $I_h$  para ser interpolada, conforme o método de krigagem ordinária, utilizado em Gardiman Junior et al. (2012) e Silva et al. (2011) na interpolação de variáveis hidrológicas.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando todos os cenários e períodos analisados, as localidades avaliadas apresentaram os índices de aridez variando entre de 0,0 mm a 10,5 mm, o

que demonstra que o estado do Paraná não apresenta e não apresentará para condições futuras, valores elevados para o déficit hídrico. Pela classificação de Thornthwaite (1948) todos os municípios estariam classificados como região com pouca ou nenhuma deficiência hídrica, mesmo frente às mudanças climáticas. Esse fato pode ser justificado porque o estado do Paraná apresenta elevados índices pluviométricos.

Sendo assim optou-se por interpolar apenas os valores de  $I_h$ , a fim de comparar os valores de excesso hídrico em diferentes condições e regiões do estado do Paraná. É importante ressaltar que os valores dos índices climáticos são calculados em função dos valores anuais de déficit e excesso hídrico, portanto ao longo do ano têm-se valores tanto de déficit quanto de excedente, e quando observa-se a redução do  $I_h$ , pode-se dizer que houve uma redução do excesso hídrico e um aumento do  $I_a$  (ou do déficit hídrico).

De uma forma geral, os dados dos  $I_h$ , depois da interpolação, variaram de 1,1mm a 206,8 mm para todos os cenários e períodos.

Neste sentido, pode-se dizer que o estado do Paraná apresenta uma grande variabilidade das condições hídricas entre as localidades, o que concorda com Wrege et al. (2001) que concluiu em seu estudo que o estado do Paraná apresenta diferenças significativas de comportamento hídrico entre várias regiões, dada a variação de temperatura e principalmente do regime pluviométrico, já que a precipitação como um componente de entrada do sistema, se torna um fator determinante no balanço hídrico. Segundo Silva e Nery (2001) o estado do Paraná apresenta significativa variabilidade da precipitação devido a diferentes fatores, que podem estar relacionados à posição geográfica da região. A maritimidade (Oceano Atlântico), continentalidade (região central e oeste do Estado), a orografia, que varia do nível do mar, na costa, a altitudes de 1000 metros, aproximadamente, na região sul, o efeito do Trópico de Capricórnio, que corta a região norte do Estado e o fato do estado estar localizado na transição entre o tropical e o temperado quente são os principais fatores. Sendo assim o Estado se encontra sob a influência das diferentes latitudes e também da topografia o que pode explicar a variabilidade dos valores de precipitação, e conseqüentemente das suas condições hídricas.

Observa-se para todas as condições analisadas (Figuras 3.2, 3.3 e 3.4) que os  $I_h$  reduziram gradativamente do sul ao norte, acompanhando a tendência espacial da precipitação observada por Silva e Nery (2001) e Sousa (2006), que concluiriam

que chove mais na região sul e menos ao norte do estado. Sousa (2006) ainda afirmou que essa variabilidade esta associada às características do relevo e entradas de massas de ar observadas nestas duas regiões.

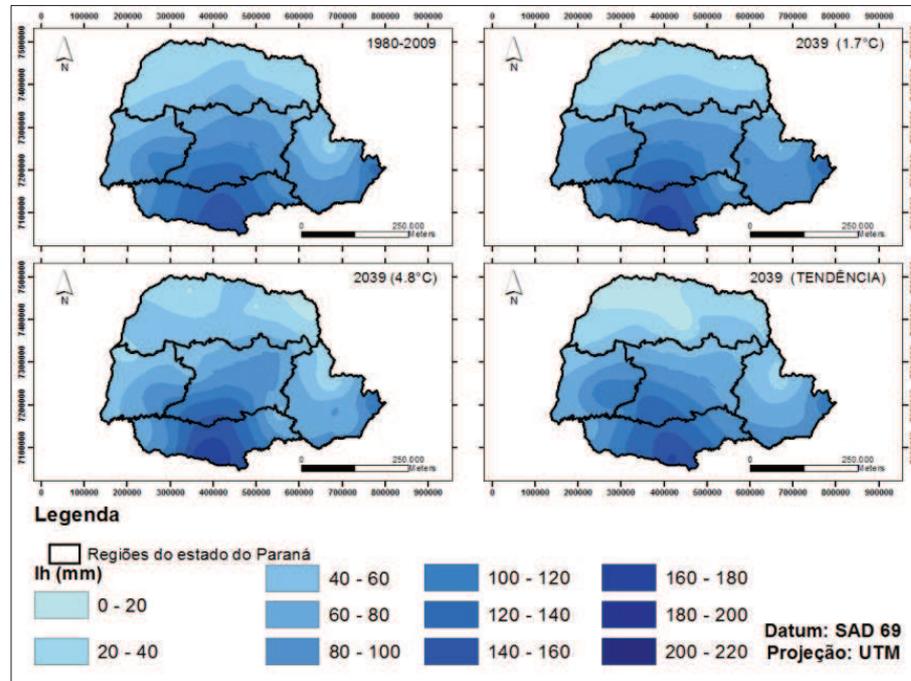
### 3.1 BALANÇO HÍDRICO PARA O PERÍODO DE 1980 A 2009

O balanço hídrico calculado pelas normais climatológicas, representando as condições atuais, apresentou os valores de  $I_h$  entre 22,1 mm a 158,9 mm, o que concorda com resultados obtidos por Sampaio et al. (2011) que demonstram que o estado do Paraná apresenta os  $I_h$  variando de 0mm a valores próximos de 100mm. Observa-se no mapa, que para o período de 1980 a 2009 (Figuras 3.2; 3.3 e 3.4) a região norte apresenta os valores mínimos de 20 a 40 mm e a região sul os maiores valores (140 - 160 mm), já indicando uma diferença hídrica entre essas regiões.

### 3.2 PERÍODO DE 2039

A alteração na temperatura projetada na simulação ocorre de forma gradual, de maneira que o aumento de 1,7°C, 4,8°C ou a alteração encontrada na tendência dos dados ocorrerá de forma plena apenas em 2099.

**Figura 3.2** – Valores de  $I_h$  interpolados para o ano de 2039 frente aos três cenários climáticos simulados (1,7°C, 4,8°C e Tendência).



Fonte: Elaborado pela autora. Base vetorial: IBGE 2014.

Para o primeiro período analisado (2039), frente aos três cenários climáticos, pode-se observar nos mapas (Figura 3.2) que houve a inclusão da primeira classe de valores de  $I_h$ , ou seja, valores de 0 a 20 mm e da classe com valores de 160 a 180 mm, os quais não apareciam no período histórico. Sendo assim, é possível dizer que na região do extremo norte, houve uma pequena redução do  $I_h$ , e na região do extremo sul, um discreto aumento do  $I_h$ . No cenário de tendência, onde o  $I_h$  variou de 4,0 a 164,2 mm, a redução do índice no norte fica mais evidente, já que valores mais baixos abrangem uma área maior. Isso pode ser explicado pelo fato de que a região ao norte, principalmente extremo norte, apresentou em média uma tendência positiva relativamente elevada na temperatura, de forma que o aumento da temperatura e conseqüentemente o aumento da evapotranspiração foi maior que o aumento da precipitação, ou seja, o valor de déficit anual e do  $I_a$  aumentaram, reduzindo assim o valor do  $I_h$ . No primeiro e segundo cenário, essa redução do  $I_h$  foi mais discreta, aparecendo em menor área. Isso porque o aumento na temperatura não foi suficiente para aumentar a evapotranspiração de forma que aumentasse

significamente o  $I_a$ . Os  $I_h$  para estes cenários variaram de 17,6 a 171,1 mm para o primeiro e de 7,2 a 171,9 mm para o segundo cenário.

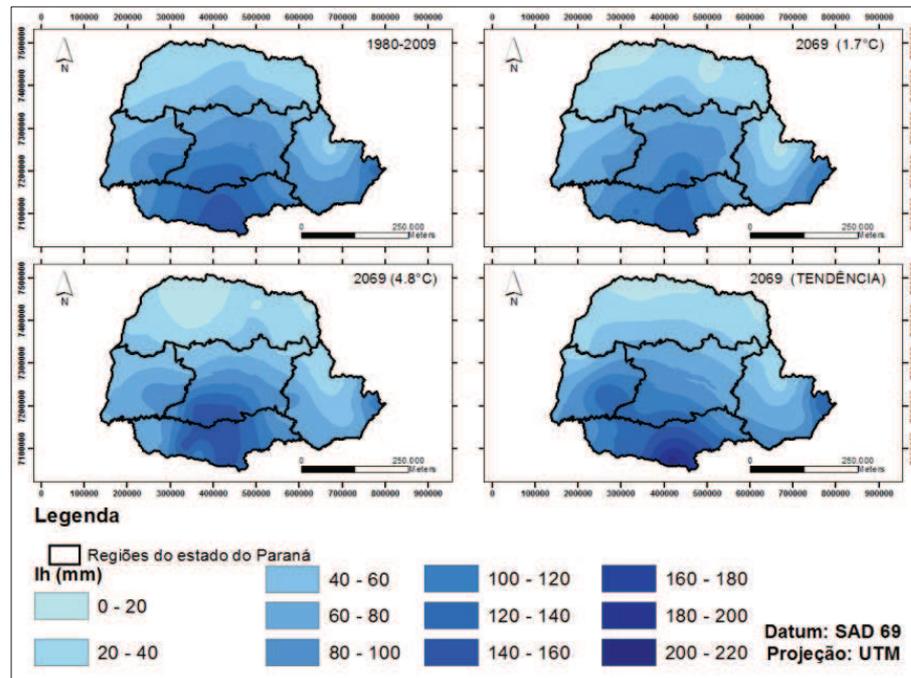
A região norte do Estado apresentou reduções no  $I_h$ , para os três cenários e a região sul, como um todo, uma discreta redução em termos de área, sendo que o aumento do  $I_h$  mesmo que muito discreto, ocorreu apenas no extremo sul, de forma pontual e próximo aos municípios de Palmas, Clevelândia e Pato Branco. Esse aumento pode ser explicado pelo fato da região possuir elevado índice pluviométrico, comparado às outras regiões do estado. Sendo assim, as alterações na temperatura e precipitação foram responsáveis pelo aumento ainda mais da precipitação e conseqüentemente do excedente hídrico e do  $I_h$ . Resultados de aumento no excesso hídrico também foram obtidos por Horikoshi e Fisch (2007) como conseqüência de um aumento de 0,5°C em conjunto com um aumento na precipitação projetada para o ano de 2039 no município de Taubaté.

Observa-se que para o primeiro cenário houve um pequeno aumento do  $I_h$  na região leste do Estado, já nas regiões central e oeste não houve alterações relevantes. No entanto, para o segundo e terceiro cenários os  $I_h$ 's reduziram nas regiões leste, central e oeste, de forma que o segundo cenário foi responsável por uma maior redução.

### 3.3 PERÍODO DE 2069

Para o período de 2069 os valores de  $I_h$  variaram de 8,9 a 140,2 mm para o primeiro cenário, de 2,2 a 153,8 mm para o segundo cenário e de 10,8 a 206,8 mm para o terceiro cenário.

**Figura 3.3** – Valores de  $I_h$  interpolados para o ano de 2069 frente aos três cenários climáticos simulados (1.7°C, 4.8°C e Tendência).



Fonte: Elaborado pela autora. Base vetorial: IBGE 2014.

Observa-se na Figura 3.3, que para a região norte houve redução do  $I_h$  em todas as condições futuras, sendo que o segundo cenário é responsável por uma redução mais evidente, seguido do primeiro e terceiro cenários.

Para as regiões sul e oeste do Estado, o aumento proporcional de 1,7°C e 4,8°C é responsável por condições futuras mais secas, comparadas ao período histórico, já o cenário de tendência (terceiro cenário) é responsável pelo aumento evidente do  $I_h$  na região sul e um aumento de parte da região oeste. É possível observar no mapa a inclusão da classe de valores de 200 a 220 mm para o sul, a qual representa os valores máximos encontrados para as condições hídricas.

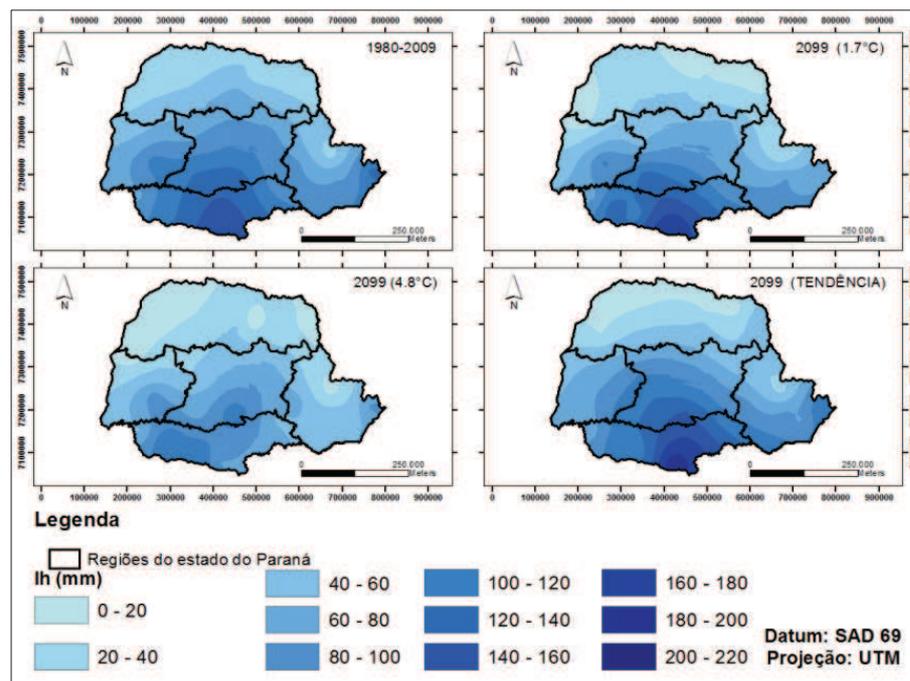
A região leste apresentou reduções no  $I_h$  para as três condições futuras, porém o segundo cenário foi responsável por reduções mais acentuadas.

De forma geral, observou-se reduções no  $I_h$  nas regiões do norte e leste para todos os cenários, sendo que as reduções mais evidentes ocorreram no segundo cenário e um aumento do  $I_h$  nas regiões sul e parte do oeste no cenário de tendência.

### 3.4 PERÍODO DE 2099

Para o período de 2099 os  $I_h$  variaram de 1,1 a 179,2 mm para o primeiro cenário, de 9,3 a 119,8 para o segundo cenário e de 10,3 a 194,4 para o terceiro cenário.

**Figura 3.4** – Valores de  $I_h$  interpolados para o ano de 2099 frente aos três cenários climáticos simulados (1,7°C, 4,8°C e Tendência).



Fonte: Elaborado pela autora. Base vetorial: IBGE 2014.

Na Figura 3.4 observa-se neste último período que todas as regiões do estado do Paraná sofreram reduções no  $I_h$  para os três cenários analisados, sendo que a redução foi mais drástica no segundo cenário (aumento total de 4,8°C). A pior estimativa que compreende o cenário A2 do quarto relatório também foi apontado como responsável por piores condições hídricas em Santos (2011). O cenário da tendência foi responsável por um aumento pontual do  $I_h$  apenas no extremo sul.

Analisando a evolução das condições hídricas nos períodos, é possível dizer que para o primeiro e segundo cenários a redução no  $I_h$  ocorreu de forma gradual, de forma menos intensa para 2039 e mais intensa para 2099. Resultados semelhantes foram obtidos em Salati et al. (2007) onde o excesso da água diminuiu em 70% para o ano de 2040 e em 100% para o ano de 2100 na Bacia do Prata.

Essa redução, no presente estudo, seguiu de forma gradual em termos de área, se expandindo da área norte em direção ao sul, ao longo dos períodos analisados. Estes cenários foram responsáveis por reduções do  $I_h$  principalmente na região norte. A pior condição hídrica encontrada ocorreu em 2099, onde o segundo cenário (aumento de 4,8°C) foi responsável por reduções mais drásticas em todas as regiões do Estado. Para o primeiro e segundo cenários, pode-se concluir que o aumento na temperatura é responsável pelo aumento da demanda hídrica, ou seja, da evapotranspiração e do  $I_a$  na maioria das localidades do estado do Paraná. Sendo assim é responsável pela redução na disponibilidade hídrica, mesmo em localidades em que a precipitação é alta, ou seja, a diferença entre a oferta (precipitação) e a demanda hídrica (evapotranspiração) passa a ser maior, aumentando assim o  $I_a$  e reduzindo o  $I_h$  na maioria das localidades. Garcia (2010), analisando também dois cenários do IPCC e os impactos no balanço hídrico de Ituverava-SP, mostra que o aumento da temperatura provoca o aumento da evapotranspiração, e mesmo que haja um aumento no total de precipitação, a demanda hídrica (evapotranspiração) não conseguirá ser suprida com a precipitação ocorrida.

Já o cenário de tendência foi responsável pela redução do  $I_h$  na região norte e um aumento do mesmo no extremo sul. Isso pode ser explicado pelo fato que a região sul apresenta precipitações elevadas, e a alteração na temperatura, seguindo a tendência, não foi responsável pelo aumento do déficit, ou seja, a quantidade de precipitação supre a demanda hídrica (evapotranspiração), mesmo que essa possa ter sofrido uma pequena redução devido ao aumento na temperatura. Pode-se observar para este cenário que localidades com temperatura alta e pouca precipitação, (localidades ao norte) sofreram reduções no  $I_h$ , e as localidades com temperaturas amenas e maior precipitação (extremo sul) sofreram aumento no  $I_h$ . Sendo assim, o aumento ou redução acontece de forma pontual e local. Estes resultados também ocorreram de forma semelhante para o ano de 2039, onde a alteração na temperatura ainda foi pequena.

De uma forma geral, observa-se para a região norte uma forte redução na disponibilidade hídrica para todas as condições climáticas futuras analisadas, pois é uma região com menor precipitação, e o aumento na temperatura projetado nos três cenários se torna responsável pelo aumento da evapotranspiração e do déficit hídrico anual. Já para a região sul, a condição hídrica depende de cada cenário

projetado, uma vez que para o primeiro e segundo cenários houve reduções na área total, e para o cenário de tendência houve um aumento do  $I_h$  em regiões específicas do sul.

Também se percebe que ao longo dos períodos avaliados essa redução atinge áreas ao sul do Estado. Esta alteração do balanço hídrico, evidente na região norte, concorda com os resultados obtidos por Assad (2004), que observou que haverá um deslocamento da área produtiva do café para a região Sul e uma redução de área apta para a referida cultura de 75% no Paraná.

#### **4 CONCLUSÃO**

O cálculo dos balanços hídricos frente aos cenários climáticos futuros permitiu investigar e analisar as possíveis condições hídricas para o estado do Paraná ao final do século XXI. A ferramenta de interpolação permitiu que estas condições fossem analisadas em qualquer local do Estado, mesmo onde as informações climáticas não estão disponíveis.

De forma geral, pode-se concluir que tanto um aumento de 1,7°C quanto o de 4,8°C (cenários do IPCC) foram responsáveis por reduções na disponibilidade hídrica na maioria do estado do Paraná, sendo que o aumento de 4,8°C é responsável por causar condições mais secas. Para estes cenários, fica evidente a forma com que a disponibilidade hídrica se reduz ao longo dos períodos, sempre reduzindo de forma gradual da região sul à região norte, sendo que conforme a evolução temporal a redução na disponibilidade hídrica atinge cada vez mais a região ao sul.

Os resultados obtidos das condições hídricas, no cenário de tendência, em termos de distribuição espacial, diferem dos outros cenários, pois as alterações projetadas seguiram a tendência de cada local, ou seja, para cada das 28 localidades projetou-se uma alteração na temperatura e também na precipitação, já que esta foi dada proporcionalmente à alteração encontrada na temperatura. Isso pode justificar o aumento do  $I_h$  em locais que chovem mais e a redução em locais que chovem menos.

As condições hídricas simuladas para o ano de 2099 para todos os cenários, revela uma grande preocupação ambiental, social e econômica que deve ser considerada por gestores regionais, visto que a alteração na disponibilidade hídrica pode afetar setores importantes da sociedade.

## CONCLUSÕES FINAIS

O Artigo 1 tratou-se de um estudo piloto, pelo qual pode-se testar e analisar a metodologia referente ao balanço hídrico, que por sua vez foi aplicada em 28 municípios do estado do Paraná no último artigo elaborado. Concluiu-se nesse primeiro artigo que o município de Ponta Grossa não apresenta deficiência hídrica mesmo frente às mudanças climáticas. Mas foi possível observar que houve um pequeno aumento do índice hídrico para o município estudado, porém não há como comparar com os resultados obtidos no terceiro artigo, uma vez que as projeções na precipitação diferiram para os dois trabalhos. É importante dizer que o aumento na precipitação pluvial para o primeiro trabalho foi de 10% para cada um grau na temperatura, o que pode ter sido responsável pelo aumento do índice hídrico desta região. Além disso considerou-se neste trabalho apenas os cenários do quarto relatório do IPCC.

A fim de criar um terceiro cenário a ser avaliado no final do trabalho como um todo, elaborou-se o segundo artigo que teve como objetivo avaliar a tendência temporal e espacial da temperatura máxima e mínima do ar para a série histórica de 1980 a 2009 das 28 localidades do estado do Paraná. Este segundo artigo gerou resultados que representam a alteração na temperatura ocorrida no período histórico e para cada localidade e mês. Esta alteração foi estimada pela regressão linear onde o coeficiente angular representou a magnitude da tendência. A interpolação permitiu a interpretação dos dados para toda a região do Paraná, que de uma forma geral, apresentou uma grande variabilidade das alterações entre as localidades, desde redução a aumento na temperatura. É importante dizer que as tendências locais devem ser analisadas e monitoradas ao longo do tempo, ou seja, que as séries de dados mais recentes devam ser também avaliadas.

O terceiro e último artigo foi elaborado a fim de atingir o objetivo geral do trabalho como um todo, que é avaliar o impacto das mudanças climáticas em todo o estado do Paraná. Para tanto, se considerou dois cenários climáticos projetados pelo quinto relatório do IPCC e também o cenário de tendência que levou em consideração os resultados obtidos no segundo artigo. Os resultados gerados no último artigo, permitiram a análise do balanço hídrico frente às mudanças climáticas e, por meio dos resultados encontrados, pode-se concluir que a região norte do estado Paraná poderá sofrer reduções na disponibilidade hídrica em todos os

cenários projetados, sendo que a pior condição hídrica provavelmente acontecerá no período de 2099 com aumento de 4,8°C.

Diante dos resultados obtidos pelos três trabalhos, ressalta-se a importância de estudos envolvendo mudanças climáticas e disponibilidade hídrica, visto que os impactos gerados poderão atingir a sociedade de modo em geral. Portanto, estes resultados são de suma importância e devem ser considerados no manejo e gestão dos recursos hídricos, principalmente no âmbito regional.

## REFERÊNCIAS GERAIS

ANA. 2007. **GEO Brasil: recursos hídricos: resumo executivo**. Ministério do Meio Ambiente; Agência Nacional das Águas; Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente: Brasília, 60p, 2007.

ANGIONELLA, G.; VASCONCELLOS, V. L. D.; ROSA, J. W. C. Estimativa e espacialização do balanço hídrico na mesorregião sul da Bahia. *Bahia Agrícola.*, v.6, n.1, nov. 2003.

ArcGIS Resources. Disponível em: <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#//009z00000078000000>. Acesso em: Julho de 2014.

ASSAD, E. D. et al. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.11, p.1057-1064, nov. 2004.

BAE, D. H.; JUNG, I. W.; LETTENMAIER, D. P. Hydrologic uncertainties in climate change from IPCCAR4 GCM simulations of the Chungju Basin, Korea. **Journal of hydrology**, v.401, p.90–105. 2011.

BACK, A. J.; BRUNA, E. D.; VIEIRA, H. J. Tendências climáticas e produção de uva na região dos Vales da Uva Goethe. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.47, n.4, p.497-504, abr. 2012.

BLAIN, G. C. Séries anuais de temperatura máxima média do ar no estado de São Paulo: variações e tendências climáticas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.1, p.114 - 124. 2010.

BLAIN, G. C; PICOLI, M. C. A.; JORGE LULU J. Análises estatísticas das tendências de elevação nas séries anuais de temperatura mínima do ar no estado de São Paulo. **Revista Bragantia**, v.68,p. 807-815.2009

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, v.59, n.2, p. 125-137, jul. 2000.

CARVALHO, J. R. P. DE; SILVEIRA, P. M. DA; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.8, p.1151-1159. 2002.

CARVALHO, S. M.; STIPP, N. A. F. Contribuição ao estudo do balanço hídrico no estado do Paraná: uma proposta de classificação qualitativa. **Geografia**, Londrina, v.13, n.1, p.57-71. 2004.

CASTRO, F. S. et al. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v.14, n.8, p.871–880. 2010.

CHEN, J.; BRISSETTE, F. P.; LECONTE, R. Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. **Journal of hydrology**, n.401, n.3-4, p.190–202. 2011.

CHRISTOFARO, C.; LEÃO, M. M. D. Caracterização temporal do arsênio nos cursos d'água da bacia hidrográfica do Rio das Velhas, MG, Brasil, ao longo de uma década (1998 – 2007). **Ambi-Agua**, Taubaté, v.4,n.3,p-54-66. 2009.

COSTA, A. B. F. da; MORAIS, H.; CARAMORI, P. H. Análise das temperaturas máximas nos meses frios no estado do Paraná. **Revista Geonorte, edição especial 2**, v.1, n.5, p.1189 –1195. 2012.

COUTINHO, M. D. L.; MORAIS, M. D. C. Balanço Hídrico da Climatologia Média e de Cenários Climáticos em São José de Mipibu – RN. **Revista Brasileira de Geografia Física**, n. 3, p. 694-707. 2012.

FATICHI, S.; IVANOV, V. Y.; CAPORALI, E. Simulation of future climate scenarios with a weather generator. **Advances in water resources**, n. 34, p. 448–467. 2011.

FELGUEIRAS, C. A. **Modelagem ambiental com tratamento de incertezas em sistemas de informação geográfica: o paradigma geostatístico por indicação**. 1999, 212f. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.

FRANÇA JUNIOR, P. ; VILLA M. E. C. D. Análise macroscópica nas cabeceiras de drenagem da área urbana de Umuarama, região noroeste - Paraná/Brasil. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v.17, p.107-118. 2013.

GARCIA, A. Balanço hídrico de Ituverava (SP) sob condições de cenários climáticos futuros. **Nucleus**, v.7, n.1, 2010.

GARDIMAN JUNIOR, B. S. et al. Análise de técnicas de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na bacia do rio Itapemirim (ES). **Revista Ambiência**, Guarapuava (PR) , v.8, n.1, p. 61 – 71. 2012.

GASPAROTTO, F. K.; CARAMORI, P. H.; VASCONCELLOS, M. E. da C. Análise de tendência de variáveis climáticas térmicas e hídricas para o Estado do Paraná. In: Congresso brasileiro de agrometeorologia, 14., 2005, Campinas. **Anais...** Campinas: Agrometeorologia, agroclimatologia e agronegócio, UNICAMP, 2005. 2 p.

GONDIM, R. S. et al. Mudanças climáticas e impactos na necessidade hídrica das culturas perenes na Bacia do Jaguaribe, no Estado do Ceará **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, n.12, p.1657-1664, dez. 2008.

GOCIC, M.; TRAJKOVIC, S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. **Global and Planetary Change**, v.100, p.172-182. 2013.

HARTKAMP, A. D.; BEURS, K. de; STEIN, A.; WHITE, J. W. **Interpolation Techniques for Climate Variables**. NRG-GIS Series 99-01. México, 1999, 34p.

HORIKOSHI, A. S.; FISCH, G. Balanço hídrico atual e simulações para cenários climáticos futuros no Município de Taubaté, SP, Brasil. **Revista Ambiente e Água- An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v.2, n.2, p.33-46. 2007.

IAPAR. Instituto Agrônomo do Paraná. Cartas climáticas do Paraná. Disponível em <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=863>. Acesso em 2014.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001. 881pp.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva, Switzerland, 2007. 104 pp.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis-Contribution of Working Group 1 to the IPCC Fourth Assessment Report**. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2007. 996p.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013. 1535 pp.

KENDALL MG . **Rank Correlation Methods**, 4th ed., Charles Griffin: London, 1975.

LIBERATO, A. M.; BRITO, J. I. B. Influência de mudanças climáticas no balanço hídrico da Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.3, n.3, p.170-180, 2010.

LIMA, R. A. F. A.; MENEZES, H. E. A.; BRITO, J. I. B. de. Diagnóstico de tendência de mudanças na temperatura do ar no nordeste setentrional. **Revista Caatinga**, vol. 23, n. 2, p. 117-124, abril-junho. 2010.

MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná**. 4.ed. Ponta Grossa: Editora UEPG, 2012. 526p.

MANDAL, S.; CHOUDHURY, B. U.; MONDAL, M.; BEJ, S. Trend analysis of weather variables in Sagar Island, West Bengal, India: a long-term perspective (1982–2010). **Current Science**, vol. 105, n. 7, p. 947-953, 2013.

MANN, H. B. Non-parametric test against trend. In: **Econometrica**. 1945. p.245-259 Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/1907187?origin=JSTOR-pdf>. Acesso em: junho de 2013.

MCCABE JR, G. J; WOLOCK, D. M. Effects of climatic change and climatic variability on the thornthwaite moisture index in the Delaware River Basin. **Climatic Change**, v. 20, p.143-153, 1992.

MCLEOD, A. I. **Kendall: Kendall rank correlation and Mann-Kendall trend test**. R package version 2.2. 2013. Disponível em : <http://cran-r.c3sl.ufpr.br/>. Acesso em agosto de 2013.

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

MARENGO, J. A.; CAMARGO, C. C. Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960–2002. **International journal of climatology** v.28,p. 893–904. 2008.

MEDEIROS, Y. D. P. Análise dos impactos das mudanças climáticas em região semi-árida. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, n.2, p.127-136. 2003.

MINUZZI, R. B.; VIANELLO, R. L.; SEDIYAMA, G. C. oscilações climáticas em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.2, p. 227 - 236. 2010.

MINUZZI, R. B.; CARAMORI, P. H.; BORROZINO, E. Tendências na variabilidade climática sazonal e anual das temperaturas máxima e mínima do ar no Estado do Paraná. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 2, p.471-479. 2011.

MORAES, W. B. et al. Potenciais impactos das mudanças climáticas globais sobre a agricultura. **Revista Trópica**, Ciências Agrárias e Biológicas, v. 5, n. 2, p.3-14. 2011

MOSS, R. H. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v.463, p.747–756. 2010.

NALLEY D. et al. Trend detection in surface air temperature in Ontario and Quebec, Canada during 1967–2006 using the discrete wavelet transform. **Atmospheric Research**, v.132-133, p. 375-398. 2013.

NICKS, A. D., HARP, J. F. Stochastic generation of temperature and solar radiation data. **Journal of Hydrology**, v.48, p. 1-17, 1980.

NOBRE, C. A. Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país. **Parcerias Estratégicas**, n.12, 239-258. 2001.

NOBRE, C. et al. Mudanças climáticas globais e regionais. In: **Riscos das Mudanças Climáticas no Brasil**. 2011. p.25-31.

OLIVEIRA, V. P. S.; ZANETTI, S. S.; PRUSKI, F. F. CLIMABR Parte I: Modelo para a geração de séries sintéticas de precipitação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.3, p.348-355. 2005.

PAIVA, E. M. C. D. de; CLAKE, R. T. Análise de tendência de precipitação da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, n.10, p. 37-41.1995.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. 1a. Ed. Piracicaba: FEALQ/USP, 1997.183p.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia Agrícola**. Edição Revista e Ampliada. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – USP, Piracicaba, 2007.125 p.

PIRES, R. C. M. et al. Agricultura Irrigada. **Revista Tecnologia & Inovação Agropecuária**, v.1, n.1, p.98-111. 2008.

PYKE, C. R. Interactions between habitat loss and climate change: implications for fairy shrimp in the central valley ecoregion of California, USA. **Climatic Change**, v.68, p.199-218. 2005.

RICHARDSON, C. W.; WRIGHT, D. A. WGEN: A model for generating daily weather variables. **USDA-ARS ARS-8**, 1984. 80p.

RICKLI, L. I.; CATANEO, A.; VIRGENS FILHO, J. S. Comparação de três métodos para estimativa dos parâmetros da distribuição gama em dados diários de precipitação pluviométrica. **Energia na Agricultura** (UNESP. Botucatu. Impresso), v. 23, p. 53-61. 2008.

RÍO, S. D. et al. Spatial analysis of mean temperature trends in Spain over the period 1961–2006. **Global and Planetary Change**, v.78, p.65–75. 2011.

RÍO S DEL, PENAS A, FRAILE R. Analysis of recent climatic variations in Castile and Leon (Spain). **Atmospheric Research**, v. 73, p.69- 85. 2005.

ROLIM,G. S.,SENTELHAS, P. C., BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL TM para os cálculos de balanços hídricos:normal, seqüencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**,Santa Maria,v. 6,n.1,p133-137,1998.

SALATI, E. Impactos das Mudanças climáticas Globais em algumas regiões do Brasil através do estudo da variação do balanço Hídrico. In: WORKSHOP "CENÁRIOS CLIMÁTICOS DO SEMI-ÁRIDO E IMPLICAÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE . OS CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E AMBIENTAIS NO NORDESTE, FBDS, Fundação Brasileira de Desenvolvimento Sustentável, 2004, Fortaleza, CE. Disponível em : <http://www.fbds.org.br/Apresentacoes/FBDS-ESMMA2004.pdf>. acesso em :novembro de 2014.

SALATI, 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.

SAMPAIO, M. S. et al. Uso de Sistema de Informação Geográfica para comparar a classificação climática de Koppen-Geiger e de Thornthwaite. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15,2011, Curitiba. **Anais...** Curitiba, 2011, p.8857-8864.

SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; FOLEGATTI, M. V.; ORELLANA-GONZÁLEZ, A. M. G. Situação dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá utilizando modelo desenvolvido em dinâmica de sistemas. **Engenharia Agrícola**, v.29, n.4, p.578-590. 2009.

SANSIGOLO, C. A.; KAYANO, M. T. Tendências nas temperaturas máximas e mínimas e nas precipitações sazonais do Rio Grande do Sul (1913-2006). In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010, Belém. **Anais...** Belém, 2010.

SANTOS, D. N. dos et al. Estudo de alguns cenários climáticos para o Nordeste do Brasil. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, Campina Grande, PB, v.14, n.5, p.492–500. 2010.

SANTOS, R. S. dos; OLIVEIRA, R. A. de; SEDIYAMA, G. C. Verificação da existência de tendência nas séries de temperatura do ar em Sete Lagoas – MG. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010, Belém. **Anais...Belém-PA**, 2010.

SANTOS, D. L.; SENTELHAS, P. C. Climate Change Scenarios and Their Impact on the Water Balance of Sugarcane Production Areas in the State of São Paulo, Brazil. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 7-17. 2012.

SANTOS, L. G. **Impacto das Projeções das mudanças climáticas no balanço hídrico do solo e da soja (Gyicine max) no PAD/DF-Distrito Federal**. 2011, 37 f. Monografia (Curso de Engenharia Agrônômica) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

SEMENOV, M.A.; BARROW, E.M. Use of a stochastic weather generator in the development of climate changes scenarios. **Climatic Changes**, Amsterdam, v.35, p.397-414. 1997.

SEMENOV, M. A. Simulation of extreme weather events by a stochastic weather gellerator. **Climate Research** , v. 35, p.203-212. 2008.

SENTELHAS, P. C.; SANTOS, D. L. dos; MACHADO, R. E. Water deficit and water surplus maps for Brazil, based on FAO Penman-Monteith potential evapotranspiration. **Revista Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science**: v. 3 n. 3. 2008.

SILVA, B. B. et al. Evapotranspiração e estimativa da água consumida em perímetro irrigado do Semiárido brasileiro por sensoriamento remoto. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.47, n.9, p.1218-1226. 2012.

SILVA, M. E. S.; GUETTER, A. K. Mudanças climáticas regionais observadas no estado do Paraná. **Terra Livre**, São Paulo v. 1, n. 20, p. 111-126. 2003.

SILVA, I. F.; NÓBREGA, R. S.; GALVÍNCIO, J. D. Impacto das mudanças climáticas nas respostas hidrológicas do Rio Ipojuca (PE) – Parte 2: Cenários de aumento de temperatura. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.2, n.2, p.19-30, 2009.

SILVA, K. R. et al. Interpolação Espacial da Precipitação no Estado do Espírito Santo. **Floresta e Ambiente**; v.18, n4, p:417-427, 2011.

SILVA, E. S.; NERY, J. T. Distribuição espacial e temporal da precipitação na região Centro-Sul do Paraná. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 12, 2001, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2001. p.111-12.

SOUSA, P. **Estudo da variabilidade da precipitação no Estado do Paraná associado à anomalia da TSM no oceano Pacífico**. 2009, 72 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá. Programa de Pós-graduação em Geografia, 2006.

SOUZA, W. M.; AZEVEDO, P. V. Avaliação de tendências das temperaturas em Recife-PE: mudanças climáticas ou variabilidade. **Engenharia Ambiental – Espírito Santo do Pinhal**, v. 6, n. 3, p. 462-472, set/dez. 2009.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Simulação do impacto da mudança climática sobre a água disponível do solo em agroecossistemas de trigo, soja e milho em Santa Maria, RS. **Ciência Rural**, v.36, n.2, p.424-433, 2006.

STRECK, N. A. et al. Variabilidade interdecadal na série secular de temperatura do ar em Santa Maria, RS. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.46, n.8, p.781-790, ago. 2011.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical review**, v.38, p. 55-94.1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance. Publications in climatology**, New Jersey: Drexel Institute of technology, 1955.104p.

TUNDISI, J. G. **Água no Século XXI: Enfrentando a Escassez**. Editora RiMa e Instituto Internacional de Ecologia, São Carlos, 2003. 248 p.

VIRGENS FILHO, J. S. **Modelo computacional para simulação de dados climáticos**. 1997. 86 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1997.

VIRGENS FILHO, J. S. **Ferramenta computacional para simulação de séries climáticas diárias, baseada na parametrização dinâmica das distribuições de probabilidade**. 2001. 92f. Tese (Doutorado em Energia e Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

VIRGENS FILHO, J. S.; LEITE, M.L. Simulation of climate scenarios for the region of Campos Gerais, State of Paraná, Brazil. In: IUFRO Landscape Ecology Working Group International Conference, 2010, Bragança-Portugal. **Anais...** Bragança-Portugal: Instituto Politécnico de Bragança, 2010. p.364-369.

VIRGENS FILHO, J. S. et al. Desempenho dos modelos CLIGEN, LARS-WG e PGECLIMA\_R na simulação de séries diárias de temperatura máxima do ar para localidades do estado do Paraná. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v.33, n.3, p.538-547. 2013.

XAVIER DA SILVA, J. Geoprocessamento e análise ambiental. **Revista Brasileira de Geografia**, vol. 54, p. 47-61. 1992.

XAVIER, T. M. T et al. Balanço hídrico da microbacia hidrográfica do Córrego Cristal, Jerônimo Monteiro-ES. In: XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2011, SESC Centro de Turismo de Guarapari, Guarapari - ES. **Anais...Guarapari-ES**: 2011.

WANDERLEY, H. S; AMORIM, R. F. C; CARVALHO, F. O. Variabilidade espacial e preenchimento de falhas de dados pluviométricos para o estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, n.3, 347 - 354, 2012.

WREGGE, M.S.; et al. Determinação das melhores épocas de semeadura do arroz de sequeiro, *Oryza sativa*, no Estado do Paraná. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 23, n. 5, p. 1179-1183, 2001.

YU, P - S.; YANG, T-S.; WU, C-K. Impact of climate change on water resources in southern Taiwan. **Journal of Hydrology**, n.260, p.161-175, 2002.

ZHANG, H. et al. Uncertainty assessment of climate change impacts on the hydrology of small prairie wetlands. **Journal of hydrology**, v.396, p.94–103. 2011.