

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Romário Moraes Carvalho Neto

**ANÁLISE DE INCERTEZAS DO BALANÇO HÍDRICO
CLIMATOLÓGICO ESPECIALIZADO**

Santa Maria, RS, Brasil
2016

Romário Moraes Carvalho Neto

**ANÁLISE DE INCERTEZAS DO BALANÇO HÍDRICO
CLIMATOLÓGICO ESPACIALIZADO**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Manejo Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Florestal**.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Jussara Cabral Cruz

Santa Maria, RS, Brasil
2016

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Carvalho Neto, Romário Moraes
ANÁLISE DE INCERTEZAS DO BALANÇO HÍDRICO
CLIMATOLÓGICO ESPACIALIZADO / Romário Moraes Carvalho
Neto.- 2016.
145 p.; 30 cm

Orientadora: Jussara Cabral Cruz
Coorientador: Giai Petit
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2016

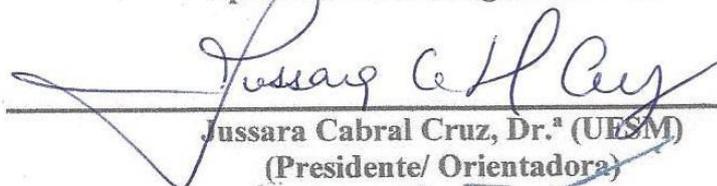
1. Balanço Hídrico Climatológico 2. Análise de
incertezas 3. Déficit hídrico 4. Excesso hídrico I. Cruz,
Jussara Cabral II. Petit, Giai III. Título.

Romário Moraes Carvalho Neto

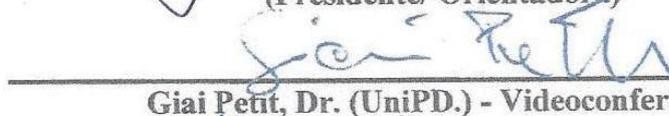
**ANÁLISE DE INCERTEZAS DO BALANÇO HÍDRICO
CLIMATOLÓGICO ESPECIALIZADO**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Manejo Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Florestal**.

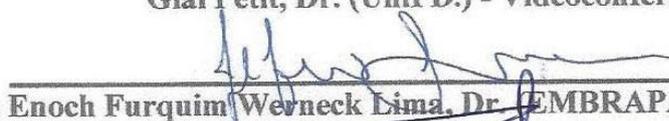
Aprovado em 5 de agosto de 2016:



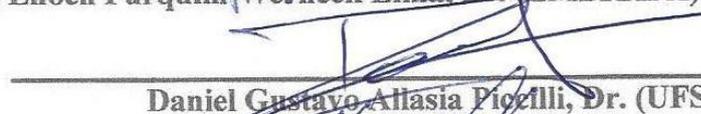
Jussara Cabral Cruz, Dr.^a (UFSM)
(Presidente/ Orientadora)



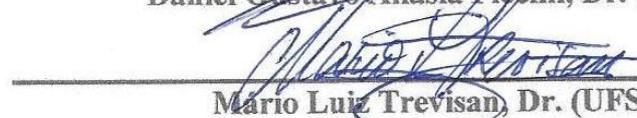
Gaii Petit, Dr. (UniPD.) - Videoconferência



Jorge Enoch Furquim Werneck Lima, Dr. (EMBRAPA) - Videoconferência



Daniel Gustavo Atlasia Picelli, Dr. (UFSM)



Mário Luiz Trevisan, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS, Brasil
2016

AGRADECIMENTOS

Muito foi o apoio, a força, o incentivo, o carinho, a paciência, a compreensão e a atenção recebida de muitas pessoas para a realização deste trabalho. Foi um tempo precioso e muito especial este, dedicado à essa obra, em que pude contar com pessoas também especiais durante esse percurso.

Meus agradecimentos vão a todas pessoas que direta, ou indiretamente contribuíram para essa realização, em especial:

- a Deus, que colocou essas pessoas especiais no meu caminho;
- à minha família, que me deu todo o respaldo para concretizar esse trabalho, tornando o caminho, de certa forma, mais suave nas horas turbulentas. Minha esposa que sempre foi meu braço direito, esquerdo e, as vezes, até a cabeça um pouco. Minha filhinha, de dois anos, que embora não saiba, possui um sorriso, um abraço e um beijinho muito revigorantes;
- à minha orientadora, Jussara Cabral Cruz, que soube me incentivar nesse longo percurso, orientando com clareza e atenção, às vezes quase de mãe. Pelo exemplo e horas sacrificadas para a minha orientação e também, quando necessário, aconselhamentos;
- ao meu orientador durante o doutorado sanduíche, Gaii Petit, bem como a Mário A. Lenzi, Marco Borga e Emanuel Rigon, pelo auxílio e tutela quando em país estrangeiro;
- aos colegas do TESAF, da UniPD, muito importantes na minha estadia durante o sanduíche. Foi ótimo ter conhecido e trabalhado com pessoas que gostam do que fazem;
- aos colegas do grupo de pesquisa GERHI, da UFSM, que são exemplos de dedicação à pesquisa;
- à CAPES, pelo suporte financeiro, tanto na UFSM com no PDSE;
- ao Prof. Rafael Cabral Cruz, que tenho muito apreço, não só por já ter me orientado no mestrado mas por, mesmo estando enfermo, ter feito o possível para participar da minha defesa de tese, fato esse que nunca vou esquecer e que fez crescer a minha admiração.

Espero que, durante esse tempo eu tenha conseguido absorver algumas qualidades dessas pessoas tão especiais com quem convivi.

Por fim, agradeço ao apoio fundamental de duas pessoas que estavam comigo no início desse percurso, mas que seguiram "para o outro lado do véu" durante esse trabalho: minha mãe, Vera Lúcia Ramos Medeiros, e minha avó, Alir Ramos Medeiros, que, embora não estejam fisicamente presentes neste momento, estarão sempre comigo.

Sei que estão velando por mim...

RESUMO

ANÁLISE DE INCERTEZAS DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO ESPACIALIZADO

AUTOR: Romário Moraes Carvalho Neto
ORIENTADORA: Jussara Cabral Cruz

O Balanço Hídrico Climatológico (BHC) espacializado é um modelo que simula a variação da disponibilidade de água no solo, para as plantas, de forma distribuída no espaço. É importante compreender as possíveis incertezas desta espacialização, para que sejam discutidas suas possibilidades de emprego em políticas públicas, as vantagens de sua utilização, bem como as suas limitações, para se ter um resultado satisfatório em seu uso e possibilite sua otimização. Procurando conhecer as incertezas na espacialização do BHC, objetiva-se nesta tese avaliar tais incertezas em decorrência de: 1) os métodos de espacialização e 2) a densidade de informação utilizada para a espacialização. Para analisar a questão das incertezas referentes aos métodos de espacialização, foram analisados dois métodos. O primeiro consiste em calcular o BHC pontualmente nas estações e depois espacializar esses valores, por interpolação (princípio Cálculo-Interpolação, CI), enquanto o segundo método consiste em interpolar primeiro as variáveis do BHC (precipitação e evapotranspiração) e, depois, calculá-lo para cada pixel (princípio Interpolação-Cálculo, IC). Complementarmente, foram analisadas também a influência dos interpoladores. Para analisar as incertezas referentes à densidade das informações utilizou-se a estratégia de comparar as diferenças geradas nos resultados das interpolações da precipitação, da evapotranspiração e do cálculo do BHC espacializado, suprimindo estações e analisando o erro gerado por esse decréscimo de densidade de informação. Essa análise foi feita, primeiro com a supressão de uma estação e depois, suprimindo duas, três e assim por diante, até que restassem um mínimo de 3 estações, referente ao número mínimo de pontos necessários para realização de interpolação. Para possibilitar a espacialização do BHC de forma distribuída, desenvolveu-se uma ferramenta, em linguagem de programação PythonTM, utilizando do *package* ArcPy[®] para realizar os cálculos do BHC. A área de estudo desse trabalho foi a planície de Vêneto, Região da Itália. Os resultados mostraram que embora as análises tenham indicado uma tendência de menores incertezas com o método IC em relação ao CI, essas diferenças não apresentaram significância estatística, ao nível de 5%. Observou-se também que o método CI traz maiores incertezas à espacialização em especial quando existe déficit hídrico no BHC e/ou recarga do solo, por suavizar tais valores de balanço entre estações, não representando propriamente o BHC nestas áreas. A análise de incertezas realizada neste trabalho também conseguiu demonstrar quais meses podem carregar maiores incertezas em suas espacializações, tanto para P, ETo e o BHC e que a alta variabilidade da precipitação carrega incertezas na sua espacialização. A representação espacial do BHC demonstrou, para este estudo, maiores incertezas no começo de épocas de estiagem, quando começa o deplecionamento do armazenamento, ou começo das precipitações que provocam o enchimento do reservatório no solo. As incertezas estimadas para a redução de estações de 15 para 3, variaram de 3 a 27% para precipitação, de 1 a 36% para ETo e de 1 a 88% para o BHC, considerando 16 estações como a verdade de referência. Como o método IC permite a espacialização do BHC com diferentes cenários de Capacidade de Água Disponível (CAD), o que não é viável com o método CI, dado que CI considera apenas a CAD no local da estação, a utilização do método IC se mostrou mais adequado para representar o BHC em escalas menores (áreas maiores). Tal possibilidade proporciona mais opções de aplicação da espacialização do BHC nas políticas públicas, possibilitando a geração de cenários de culturas de forma mais detalhada e dinâmica que o método CI, além de adequar-se a realidade de cada tipo de solo.

Palavras-chave: Incertezas. Análise de Incertezas. Disponibilidade Hídrica. Déficit Hídrico. Excesso Hídrico. Balanço Hídrico Climatológico Espacializado. BHC. Python. Thornthwaite.

ABSTRACT

UNCERTAINTY ANALYSIS OF THE SPATIALIZED CLIMATIC WATER BALANCE

Author: Romário Moraes Carvalho Neto

Advisor: Jussara Cabral Cruz

The spacialized Climatic Water Balance (CWB) is a model that simulates the availability of water in the soil, for plants, in a space distributed manner. It is important to understand the possible uncertainties of this spatialization, so the opportunities of its use in the public policies can be discussed, as well as the advantages of its use, its limitations, having a satisfying result in its use and that its optimization may be allowed. Searching to know the uncertainties in the CWB's spatial distribution, this thesis aims to evaluate such uncertainties due to: 1) the spatialization methods and 2) the density of information used for the spatialization. To address the matter of the uncertainties regarding the spatialization methods, two methods were analyzed. The first one calculates the CWB punctually at stations and then spatializes these values by interpolation (Calculation-Interpolation principle, CI), while the second method is to interpolate first the CWB's variables (precipitation and evapotranspiration) and then calculates it for each pixel (Interpolation-Calculation principle, IC). In addition, the influence of the interpolators were also analyzed. To analyze the uncertainties relating to the density of information, the strategy of comparing the differences arising from the results of the precipitation and the evapotranspiration interpolations and the calculation of the spacialized CWB was used, deleting stations and analyzing the error generated by this decrease of information density. This analysis was first done with the suppression of one station and then, by removing two, three and so on, until the remaining of 3 stations, referring to the minimum number of points required to perform interpolation. To make possible the spatialization of the CWB in a distributed way, a tool in the PythonTM programming language, using the package ArcPy® was created to perform the calculations of the CWB. The study area of this work was the plain area of Veneto, Region of Italy. The results showed that although the analyzes have indicated a trend of smaller uncertainties in the IC method in relation to the CI, these differences were not statistically significant at the 5% level. It was also observed that the CI method brings more uncertainties to the spatialization, particularly when there is water deficit in the CWB and/or ground recharge, by smoothing such balance values between stations, not properly representing the CWB in these areas. The uncertainty analysis performed in this study was also able to show which months can carry greater uncertainty into their spatializations, both P, ETo and the CWB and that the high variability of precipitation carries uncertainties in their spatial distribution. The spatial representation of the CWB showed, for this study, to have greater uncertainty at the beginning of the dry season, when starts the reservoir drawdown, or the beginning of the rains that cause the filling of the reservoir in the soil. The estimated uncertainties to the stations reduction from 15 to 3, ranged from 3 to 27% for precipitation, from 1 to 36% for ETo and 1 to 88% for CWB, considering 16 stations as the truth reference. As the IC method allows the CWB spatialization with different scenarios of Available Water Capacity (AWC), which is not feasible with the CI method, since CI considers only the AWC at the station's place, the use of the IC method was more suitable to represent the CWB at smaller scales (larger areas). This possibility provides more options for the application of the spatialized CWB in public policies, allowing the generation of crops scenarios in a more detailed and dynamic way than the CI method, besides the possibility of its adequacy to the reality of each soil type.

Key-words: Uncertainties. Uncertainties Analysis. Water Availability. Water Deficit. Water Surplus. Spatilized Climatic Water Balance. CWB. Python. Thornthwaite.

LISTA DE FIGURAS

MATERIAIS E MÉTODOS

- Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo 43
- Figura 2 - Fluxograma de trabalho da tese. 45

FERRAMENTA RASTER PARA CÁLCULO DO BHC

- Figura 3 – Fluxograma do Modelo do Balanço Hídrico Climatológico (BHC). 49

ARTIGO 1

- Figura 1 - Ilustração da Validação Cruzada. 61
- Figura 2 - Localização das estações climatológicas de Vêneto, Itália, utilizadas no trabalho. 62
- Figura 3 - Mapas da espacialização das precipitações, interpoladas pelo método Inverso da Potência das Distâncias (IDW). 65
- Figura 4 - Fluxograma das etapas metodológicas para a comparação entre o método Cálculo-Interpolação (CI) e Interpolação-Cálculo (IC). 66
- Figura 5 - Esquema da comparação entre a espacialização do BHCicIDW pelo método IC e a espacialização do BHCciIDW pelo método CI. 67
- Figura 6 - Esquema da comparação entre a espacialização do BHCicIDW pelo método IC e a espacialização do BHCciKRIG pelo método CI. 68
- Figura 7 - Esquema da comparação entre a espacialização do BHCicKRIG pelo método IC e a espacialização do BHCciIDW pelo método CI. 68
- Figura 8 - Esquema da comparação entre a espacialização do BHCicKRIG pelo método IC e a espacialização do BHCciKRIG pelo método CI. 69
- Figura 9 - Balanço Hídrico Climatológico (BHC) espacializado pelo método Cálculo-Interpolação (CI), pelo interpolador IDW, identificado por BHCciIDW. 73
- Figura 10 - Balanço Hídrico Climatológico (BHC) espacializado pelo método Interpolação-Cálculo (IC), pelo interpolador IDW, identificado por BHCicIDW. 73
- Figura 11 - Diferença entre Balanço Hídrico Climatológico (BHC) espacializado pelo método Cálculo-Interpolação (CI), pelo interpolador IDW e o BHC espacializado pelo método Interpolação-Cálculo (IC), também por IDW, identificado como DIFcelIDW. 74
- Figura 12 - Gráfico da Estatística Raiz do "Erro" (DifCel) Médio Quadrático (REMQ em mm) das comparações entre BHCic e BHCci. 76
- Figura 13 - Diferenciação da distribuição dos valores de pixel de balanço (BHC) em ambos métodos CI e IC, para o mês de outubro. 79

Figura 14- Erros da validação cruzada dos valores de Balanço Hídrico Climatológico (BHC) gerados nos pontos (estações) conforme métodos de espacialização do BHC avaliados. 82

ARTIGO 2

Figura 1 - Ilustração da Validação Cruzada.	101
Figura 2 - Exemplo ilustrativo do comportamento da curva da Raiz do Erro Médio Quadrado (REM _Q) com o aumento de sorteios.	102
Figura 3 - Localização das estações climatológicas de Vêneto, Itália, utilizadas no trabalho.	105
Figura 4 - Gráfico da precipitação (P) média de Vêneto.	106
Figura 5 - Gráfico da evapotranspiração de referência (E _{To}) média de Vêneto.	107
Figura 6 - Gráfico do balanço hídrico (BHC) em cada estação climatológica de Vêneto.	107
Figura 7 - Fluxograma das etapas metodológicas	108
Figura 8 - Comportamento da curva da Raiz do Erro Médio Quadrático (REM _Q) para 3 estações de precipitação (P), para os meses de maio, setembro e novembro, com 300 sorteios.	112
Figura 9 - Raiz do Erro Médio Quadrático (REM _Q) de precipitação (P) em 70 sorteios, ao longo do ano.	114
Figura 10 - Valores percentuais da Raiz do Erro Médio Quadrático (REM _Q) em referência à média dos valores reais de precipitação (P).....	115
Figura 11 - Raiz do Erro Médio Quadrático (REM _Q) de evapotranspiração de referência (E _{To}) em 12 sorteios, ao longo do ano.....	117
Figura 12 - Valores percentuais da Raiz do Erro Médio Quadrático (REM _Q) de evapotranspiração (E _{To}) em referência à média dos valores reais de E _{To}	117
Figura 13 - Raiz do Erro Médio Quadrático (REM _Q) de balanço (BHC) em 50 sorteios, ao longo do ano.	119
Figura 14 - Gráfico dos valores percentuais da Raiz do Erro Médio Quadrático (REM _Q) em referência a raiz da média dos quadrados (RM _Q) dos valores de BHC.	119

LISTA DE TABELAS

REFERENCIAL TEÓRICO

Tabela 1 - Capacidade de Água Disponível (CAD) dos solos do Rio Grande do Sul, com cobertura florestal.	31
Tabela 2 - Exemplos de Aplicações do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) e do Balanço Hídrico Sequencial (BHS).	33

MATERIAIS E MÉTODOS

Tabela 3 - Estações utilizadas no estudo e período com dados	44
--	----

ARTIGO 1

Tabela 1 - Estações utilizadas no estudo e período com dados.	63
Tabela 2 - Estações utilizadas no trabalho, e respectivos dados mensais médios de precipitação (P), em mm.	64
Tabela 3 - Estações utilizadas no trabalho, e respectivos dados mensais médios de evapotranspiração de referência (ET _o), em mm.	64
Tabela 4 - Valores de Balanço Hídrico (BHC) em cada estação climatológica, para cada mês.	72
Tabela 5 - Médias de DIF _{cel} , percentual dessas médias em relação às precipitações mensais e percentual de área com DIF _{cel} positivo ou negativo, referentes à Figura 14 (IDW).	75
Tabela 6 - Teste t realizado entre as 4 análises para os meses de excesso hídrico no Balanço Hídrico Climatológico (BHC).	77
Tabela 7 - Valores da Raiz do Erro Médio Quadrático (REM _Q) resultantes da validação cruzada da precipitação e da evapotranspiração.	80
Tabela 8 - Valores de p resultantes do teste t realizado entre os erros pontuais do método Interpola-Calcula (IC) e do método Calcula-Interpola (CI).	83

ARTIGO 2

Tabela 1 - Recomendação de densidade mínima de estações, por tipo de estação, para rede hidrometeorológica, segundo a OMM.	95
Tabela 2 - Estações utilizadas no estudo e período com dados.	105
Tabela 3 - Possibilidades da análise combinatória de uma variável conforme o número de estações e variação da densidade de estações na área de estudo.	109
Tabela 4 - Quantidade de sorteios necessários para P, ET _o e BHC.	113
Tabela 5 - Valores da Raiz do Erro Médio Quadrático (REM _Q) para a precipitação (P) resultantes dos 70 sorteios.	114

Tabela 6 - Valores percentuais da Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) em referência a Média dos valores reais de precipitação (P). 116

DISCUSSÃO

Tabela 18 - Diferentes situações de séries de dados utilizáveis para a espacialização do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) no Rio Grande do Sul (RS), suas respectivas densidades e possíveis ordens de grandeza do erro percentual na média mensal do BHC. ... 131

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ARPAV	<i>Agenzia Regionale Per La Prevenzione E Protezione Ambientale Del Veneto</i>
ARM	Armazenamento de água no solo
BHC	Balanço Hídrico Climatológico
BHCci	BHC espacializado pelo método CI
BHCic	BHC espacializado pelo método IC
BHCciIDW	BHC espacializado pelo método CI por IDW
BHCciKRIG	BHC espacializado pelo método CI por Krigagem
BHCicIDW	BHC espacializado pelo método IC por IDW
BHCicKRIG	BHC espacializado pelo método IC por Krigagem
CAD	Capacidade de Água Disponível
CC	Capacidade de Campo
CI	Princípio Cálculo-Interpolação
DIFcel	BHC espacializado por CI menos o BHC espacializado por IC, ambos por IDW
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
ETo	Evapotranspiração de Referência
ETP	Evapotranspiração Potencial
ETR	Evapotranspiração Real
IC	Princípio Interpolação-Cálculo
IDW	Inverso do Quadrado da Distância - <i>Inverse Distance Weighting</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPQ	Instituto Português de Qualidade
JCGM	<i>Joint Committee For Guides In Metrology</i>
OMM/WMO	Organização Mundial de Meteorologia - World Meteorological Organization
P	Precipitação
PMP	Ponto de Murcha Permanente
REMQ	Raiz do Erro Médio Quadráticos - <i>Root Mean Square Error</i>
RMQ	Raiz da Média dos Quadrados
RS	Rio Grande do Sul
SIG	Sistema de Informação Geográfica

SUMÁRIO

1	APRESENTAÇÃO	25
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA:.....	26
1.2	OBJETIVO	27
1.2.1	Objetivos Específicos	27
1.3	ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	27
2	REFERENCIAL TEÓRICO	29
2.1	BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO	29
2.2	RELEVÂNCIA DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO/SEQUENCIAL	32
2.3	ESPACIALIZAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO	36
2.4	ANÁLISE DE INCERTEZAS	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1	ÁREA DE ESTUDO	43
3.2	FLUXOGRAMA DE TRABALHO	45
3.3	PREPARAÇÃO DOS DADOS BÁSICOS PARA O ESTUDO.....	46
4	FERRAMENTA RASTER PARA CÁLCULO DO BHC.....	49
5	ARTIGO 1 - AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ESPACIALIZAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO EM ESCALA REGIONAL....	53
6	ARTIGO 2 - IMPACTO DA DENSIDADE DE INFORMAÇÃO NA ESPACIALIZAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO E SUAS VARIÁVEIS EVAPOTRANSPIRAÇÃO E PRECIPITAÇÃO	89
7	DISCUSSÃO	129
8	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS	135
	REFERÊNCIAS.....	139

1 APRESENTAÇÃO

Com o avanço tecnológico e a busca por inovações científicas aliadas à gestão ambiental e de recursos hídricos, ferramentas são desenvolvidas com o propósito de auxiliar em avaliações, interligando princípios teóricos à realidade observada, procurando representar essa realidade em um ambiente virtual e, portanto, controlado.

O Balanço Hídrico Climatológico (BHC) é um exemplo de modelo que procura representar a integração, naturalmente existente, entre variáveis climatológicas para se compreender o comportamento do clima de um determinado ambiente.

O BHC considera, como variáveis climáticas de entrada do modelo, as variáveis de precipitação e de evapotranspiração. Para o cálculo do balanço, o modelo considera a capacidade de armazenamento de água no solo disponível para as plantas (CAD), e portanto função da profundidade das mesmas e do tipo e estrutura do solo.

Considerando que as variáveis climáticas do BHC são variáveis no espaço, assim como a CAD, é interessante desenvolver a realização dos balanços hídricos (BHC) de forma distribuída no espaço, de modo que o modelo possibilite a comparação rápida e fácil entre cenários de diferentes cultivos, analisando suas relações com a hidrologia local e identificando em que local e em que posição no ano hidrológico há viabilidade de implantação de determinadas culturas.

Esta tese discute possíveis fontes de incertezas no método de cálculo do BHC de Thornthwaite e Mather (1955) calculado de forma distribuída a partir da interpolação espacial dos valores de precipitação e de evapotranspiração provenientes de diferentes estações meteorológicas quando comparado às obtidas por meio de interpolação espacial dos valores calculados nos pontos com dados climatológicos. A questão de pesquisa refere-se a quanto o método de cálculo distribuído pode melhorar a qualidade das espacializações do BHC. Para isso, isola-se a influência da variabilidade do CAD, para poder comparar os dois diferentes métodos de espacialização do BHC. Também, é analisada a influência da densidade das informações (estações com dados) utilizadas nos dados de entrada do modelo do BHC espacializado.

Nesta tese tanto as incertezas referentes aos métodos de espacialização do BHC quanto as incertezas referentes às densidades de informação fazem referência a melhor situação apresentada no trabalho, ou seja, à maior disponibilidade de dados e estações climatológicas, pontos que foram considerados como tendo o BHC verdadeiro.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA:

O Balanço Hídrico Climatológico (BHC) de Thornthwaite e Mather (1955) pode ser compreendido, segundo D'Angiolella et al. (2005), como um método climático utilizado para estimar o teor de água existente no solo disponível à comunidade vegetal e baseia-se no princípio de conservação de massa, sendo analisado pelos insumos de entradas e pelas saídas de água do solo (TUCCI e BELTRAME, 2009).

O BHC foi desenvolvido para que, em escala mensal, com dados climáticos de precipitação e temperatura (para estimar evapotranspiração), se pudesse comparar regiões dos Estados Unidos da América e se identificassem padrões climáticos nas diferentes regiões, classificando-as conforme as disponibilidades ou déficits apresentados (THORNTHWAITE, 1948).

Para que o BHC apresente uma boa representação espacial destas tendências climáticas, é fundamental que, como em todo modelo matemático, se tenha boa qualidade nos dados de entrada e que o modelo seja capaz de realizar adequadamente o que é proposto, para que as incertezas advindas dos dados e do próprio modelo, sejam mínimas.

Toda interpolação espacial confere incertezas aos resultados. Portanto, para o BHC, além das incertezas inerentes a própria concepção do modelo, aos dados das estações, bem como as advindas do contexto atual em que se discute as mudanças mais aceleradas de clima, é preciso considerar também as incertezas devido ao método para obter espacialização.

Essas incertezas referentes ao método utilizado na espacialização do BHC, são muito relevantes quando se espacializa o BHC de forma distribuída. Se apenas uma CAD for utilizada para representar um cultivo sobre um tipo de solo, para uma escala pequena (grande área), calcular o BHC nas estações que oferecem dados, e depois interpolar esses valores é uma alternativa para representá-lo. Já se o interesse é gerar cenários para diferentes tipos de solo e diferentes cultivos, ao mesmo tempo, tal opção de método não consegue representar tais possibilidades por realizar o cálculo nas estações para apenas uma CAD por vez.

Considerando tais necessidades e verificando a importância de se discutir meios de se espacializar o BHC de forma a representar adequadamente diferentes situações e cenários, esta tese tem como objetivo:

1.2 OBJETIVO

Avaliar as incertezas do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) em decorrência dos processos de espacialização e da densidade de informação, em referência a melhor situação de disponibilidade de dados e densidade de estações.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Identificar as incertezas relacionadas aos dois princípios (métodos) utilizados para a espacialização do BHC, sendo estes o princípio Cálculo-Interpolação (CI) e o princípio Interpolação-Cálculo (IC) e aos métodos interpoladores utilizados.

O princípio CI consiste em calcular o BHC pontualmente (na estação) e depois espacializá-lo por interpolação destes pontos. O princípio IC consiste em interpolar cada variável do BHC primeiro e depois calculá-lo em cada pixel.

- Identificar as incertezas relacionadas à densidade de informação.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

A tese está composta por um referencial teórico (Capítulo 2) que contextualiza o Balanço Hídrico Climatológico (BHC), a sua espacialização e apresenta definições do termo "incerteza", terminando por relacioná-lo ao BHC.

No Capítulo 3 estão apresentados os Materiais e Métodos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa.

O Capítulo 4 foi dedicado à apresentação da ferramenta computacional desenvolvida e utilizada para realizar os cálculos do BHC espacializado em ambiente em Sistema de Informação Geográfica (SIG). Neste capítulo estão descritos o algoritmo que norteou a programação computacional e as respectivas equações.

Dois artigos científicos foram organizados, cada um para discussão de um dos objetivos específicos desta tese. O primeiro, Capítulo 5, aborda as incertezas referentes a espacialização do BHC em função de dois métodos utilizados, o princípio Cálculo-Interpolação e o princípio Interpolação-Cálculo. O segundo, Capítulo 6, realiza uma análise de incertezas do modelo do BHC em função da densidade espacial das informações, identificando a

amplitude das incertezas geradas ao longo das diferentes simulações de densidade de informação.

O Capítulo 7 contém a discussão sobre os resultados obtidos e apresentados nos capítulos 5 e 6 e como eles interagem entre si e auxiliam na avaliação das incertezas do BHC em decorrência dos processos de espacialização e da densidade de informação, objetivo maior desta tese, orientando o leitor sobre futuras aplicações do BHC espacializado conforme os resultados observados no trabalho.

Por fim, no Capítulo 8 tem-se as conclusões mais relevantes do trabalho como um todo, bem como as recomendações.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO

A realização de um balanço hídrico envolve a quantificação dos componentes do sistema em análise, visando ao melhor entendimento do seu comportamento e baseia-se no princípio de conservação de massa, sendo analisado pelos insumos de entradas e pelas saídas de água do sistema (TUCCI e BELTRAME, 2009). As possíveis entradas de água no sistema incluem precipitação, orvalho, precipitação oculta e ascensão capilar, enquanto as possíveis saídas incluem evapotranspiração, escoamento superficial, escoamento subsuperficial e escoamento-base.

D'Angiolella et al. (2005) explicam que o balanço hídrico para culturas surgiu da necessidade de se contabilizar a precipitação e a evapotranspiração que ocorre em um ecossistema, com o objetivo de se conhecer a disponibilidade de água para as plantas ao longo do ano.

Visando equacionar esta relação, surgiram diferentes métodos de se calcular o balanço hídrico. Dentre estes, o que apresentou maior difusão foi o Balanço Hídrico Climatológico (BHC) de Thornthwaite e Mather (1955), por considerar que a disponibilidade de água no solo diminui à medida que o armazenamento é reduzido, estabelecendo assim, o solo como um ingrediente ativo no seu cálculo. Este balanço hídrico, portanto, é facilmente entendido como um método climático utilizado para estimar o teor de água existente no solo e disponível à comunidade vegetal (D'ANGIOLELLA et al., 2005).

Esse teor de água pode ser compreendido da seguinte forma: o solo é o armazenador e fornecedor de água e nutrientes às plantas. Por fenômenos de adsorção e capilaridade, entre uma precipitação e outra, o solo retém a umidade que as plantas necessitam. À medida em que o solo seca, torna-se mais difícil às plantas absorverem água devido ao aumento da força de retenção, enquanto que diminui a disponibilidade hídrica no solo. Devido a isso, nem toda água que o solo consegue armazenar está disponível às plantas (RIO GRANDE DO SUL, 2010a).

A capacidade de armazenamento de água no solo é função da textura do solo e da profundidade das raízes das espécies vegetais que o cobre (ROSSATO, 2001). Segundo Rio Grande do Sul (2010a), esta capacidade de armazenamento de água no solo, máxima água disponível às plantas ou capacidade de água disponível (CAD), representa o limite de água entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). A partir desses

limites, pode-se determinar a capacidade de armazenamento de água disponível no solo, considerando a profundidade do sistema radicular.

A umidade do solo na CC representa uma quantidade de água que pode ser mantida contra a força da gravidade, considerando-se a drenagem desprezível. Desse limite até o ponto de murchamento, a água só pode ser removida por ação direta da evaporação ou evapotranspiração das plantas. Portanto, o armazenamento máximo admitido (CAD) é aquele volume que se situa entre esses dois limites, dentro de uma profundidade efetiva das raízes no solo (ROSSATO, 2001), em mm.

Esta relação entre volume máximo de água retida no solo (CAD), tipo de solo e profundidade de raízes, está exemplificada na Tabela 1, que contém os valores de CAD, em mm, para a silvicultura referente à classe de solo pertencente ao Sistema Brasileiro de Classificação de Solo (SANTOS et al., 2013), conforme Rio Grande do Sul (2010a). Estes são solos encontrados no estado do Rio Grande do Sul.

Portanto são essas relações entre ambiente, água, solo e planta que regem a interação entre as variáveis de entrada nos cálculos do BHC: a precipitação, que representa a entrada de água no sistema (solo); a evapotranspiração, que representa a saída de água do sistema pelas plantas; e a CAD como a variável representante do solo.

A precipitação é um dado primário, medido pela altura (h) de água caída e acumulada sobre uma superfície plana e impermeável, avaliada por medidas tomadas em pontos previamente escolhidos, utilizando-se aparelhos específicos denominados pluviômetros, que são receptáculos de água precipitada e expressam valores de altura pluviométrica em mm, ou pluviógrafos, que registram a altura da água no decorrer do tempo, em mm/h ou mm/min (VILLELA e MATTOS, 1975). Pinto et al. (1976) definem precipitação como a água proveniente de vapor de água da atmosfera que é depositada na superfície terrestre em qualquer forma, ou seja, chuva, granizo, orvalho, neblina, neve ou geada.

Já a evapotranspiração é um dado secundário, que necessita de outros dados medidos para ser estimado. Esses dados variam conforme o método utilizado nas estimativas da evapotranspiração. São alguns deles: Hargreaves e Samani (1985), Thornthwaite (1948), Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) e Penman-Monteith simplificado (ALLEN et al., 1998). Como a precipitação e a CAD, a evapotranspiração também é em mm.

Tabela 1 - Capacidade de Água Disponível (CAD) dos solos do Rio Grande do Sul, com cobertura florestal.

CLASSE DE SOLO*	CAD (mm)	CLASSE DE SOLO*
Latossolo Vermelho distrófico típico	400	Organossolo Tiomórfico sáprico
Argissolo Vermelho distr. Latossólico	400	
Latossolo Vermelho aluminoférrico	350	Latossolo Vermelho distroférrico
Argissolo Vermelho-Amarelo distr. Húmbr.	350	Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico
Nitossolo Vermelho distrófico típico	350	Nitossolo Vermelho alumínico típico
Planossolo Háptico eutrófico arênico	300	Planossolo Háptico eutrófico solódico.
Chernossolo Ebânico órtico vértico	300	Plintossolo Argilúvico alumínico
Argissolo BA alítico abruptico	300	Argissolo Bruno-Acinzentado alítico
Luvissole Crômico pálico saprolí.	300	
Chernossolo Ebânico carbonático	260	Cambissolo Húmico Alumínico típico
Latossolo Bruno aluminoférrico	260	Latossolo Bruno distroférrico típico
Nitossolo Bruno alumínico típico	260	Argissolo Vermelho alumínico típico
Nitossolo V distroférrico típico	260	Nitossolo V eutroférrico típico
Plintossolo Argilúvico eutrófico	260	Vertissolo Ebânico órtico cherno.
Argissolo Vermelho-amarelo eutrófico	225	Chernossolo Argilúvico carbonático
Cambissolo Háptico Ta eutrófico	200	Neossolo Flúvico Ta ou Tb distrófico
Gleissolo Háptico Ta eutrófico	200	
Gleissolo Háptico Tb eutrófico	175	Planossolo Háptico eutrófico vértico
Gleissolo Melânico Ta eutrófico	175	Gleissolo Melânico Tb eutrófico
Argissolo Amarelo alítico típico	150	
Neossolo Quartzarênico hidromórf.	125	Neossolo Quartzarênico órtico típico
Espodossolos indiscriminados	125	
Neossolo Lit. distro-úmbrico frag.	100	Neossolo Regolítico húmico léptico

Fonte: Adaptado de Rio Grande do Sul (2010a).

* Classe de Solo referente ao Sistema Brasileiro de Classificação de Solo (SANTOS et al., 2013)

O equacionamento do BHC de Thornthwaite e Mather (1955) considera o solo como um reservatório que dificulta a saída da água à medida que vai secando. Nos períodos em que o total da precipitação (P) é menor que a evapotranspiração potencial (ETP), a água retida torna-se uma função dessa demanda potencial ($P - ETP < 0$) e da Capacidade de Água Disponível (CAD) adotada. Havendo uma sequência de períodos nessa condição, a água retida no solo será uma função sequencial dos valores negativos acumulados de $P - ETP$, ou seja, da perda potencial acumulada (PEREIRA, 2005).

As escalas temporais de utilização do BHC são bem variadas. A escala mensal foi a forma original utilizada por Thornthwaite (1948) e Thornthwaite e Mather (1955), mas o BHC pode ser calculado em escala diária (LUCAS et al., 2015), decendial (INMET, 2016;

CARDOSO, 2005) anual (D'ANGIOLELLA et al., 2005; BANDOC; PRĂVĂLIE, 2015) ou mais, como em Leao (2014), que avaliou e mapeou 100 anos do comportamento do Índice de Umidade de Thornthwaite (obtido por meio do BHC) na Austrália, calculando tal índice de 20 em 20 anos para o período de 1913 a 2012. A escala temporal do BHC pode ser adaptada para qualquer escala, conforme a disponibilidade dos dados e finalidade de uso.

A metodologia do BHC, quando utilizada para um determinado período de dados contínuos, é comumente chamada na literatura de Balanço Hídrico Sequencial - BHS (LUCAS et al., 2015; INMET, 2016; CARDOSO, 2005). Esse balanço é feito em sequência, conforme a disponibilidade de dados, e é normalmente usado para um período bem delimitado e curto (conforme objetivo do trabalho), mas pode ser utilizado em grandes sequências de observações. Não representa, necessariamente, o comportamento climático de uma região, pois normalmente não é calculado com dados médios, característicos de clima (ex: 30 anos de observações), como é o BHC, mas para uma parte de um período como por exemplo: do dia 20 de janeiro a 20 de junho, dia a dia ou de hora em hora. Cabe salientar que em termos de métodos de cálculo, matematicamente os modelos BHC ou BHS são exatamente iguais, diferenciados apenas pela entrada dos dados.

2.2 RELEVÂNCIA DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO/SEQUENCIAL

Considerando a igualdade dos métodos de cálculo entre os modelos do BHC e do BHS, todos os métodos estudados nessa tese, bem como as incertezas verificadas, discussões, conclusões e recomendações, servem para tanto para o BHC como para o BHS. Alguns exemplos de utilização tanto do BHC, como do BHS, estão na Tabela 2.

O BHC, primeiramente, foi concebido para utilizar dados climáticos, visando a comparação climática entre regiões nos EUA (THORNTHWAITE, 1948 e THORNTHWAITE e MATHER, 1955). Porém, os BHC/BHS podem ser utilizados em planejamento agroflorestal e estudos de vocação territorial, como por exemplo: identificar datas de semeadura com menor ocorrência média de dias com excedente hídrico para culturas (LUCAS et al., 2015); dar subsídio ao planejamento agrícola de uma região pela espacialização das deficiências hídricas em função da CAD (CARDOSO, 2005 e FREITAS et al., 2011); estudos de viabilidade de empreendimentos agroflorestais (ORLANDINI et al., 2011).

Tabela 2 - Exemplos de Aplicações do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) e do Balanço Hídrico Sequencial (BHS).

Aplicações do BHC/BHS	Exemplos
Mudanças climáticas	Garcia (2010), Coutinho e Morais (2012) e Silva et al (2013)
Subsidiar o planejamento agrícola	Cardoso (2005) e Freitas et al (2011)
Zoneamentos	Rio Grande do Sul (2007), Brasil (2016)
Comparação climática entre regiões	Thornthwaite (1948); Thornthwaite e Mather (1955)
Identificar vocação territorial e datas de semeadura	Lucas et al. (2015)
Estudo de viabilidade	Orlandini et al. (2011)
Subsidiar a gestão das atividades agropecuárias e turísticas	Neves et al. (2011)
Planejamento hidroagrícola e ambiental em bacia hidrográfica	Santos et al. (2013)

Fonte: Próprio autor.

Além dessas aplicabilidades, o BHC/BHS também pode ser utilizado em planejamentos hidroagrícolas e ambientais de bacias hidrográficas (SANTOS et al., 2013), zoneamentos (RIO GRANDE DO SUL, 2007 e BRASIL, 2016) e estudos sobre alterações climáticas (GARCIA, 2010; COUTINHO e MORAIS, 2012 e SILVA et al., 2013). Podem também subsidiar a gestão das atividades agropecuárias e turísticas, identificando, por exemplo, as épocas mais favoráveis às atividades (NEVES et al., 2011).

Rio Grande do Sul (2007) e Brasil (2016) são dois exemplos de zoneamentos, sendo o primeiro o Zoneamento Ambiental para a atividade de silvicultura realizado para o estado do Rio Grande do Sul e o segundo o Zoneamento Agrícola de Risco Climático, utilizado para auxiliar no seguro agrícola no Brasil.

Esses são apenas alguns exemplos que demonstram a aplicabilidade do modelo às políticas públicas. Políticas públicas são conjuntos de programas, ações e atividades desenvolvidas pelo Estado, direta ou indiretamente, que visam assegurar determinado direito de cidadania, de forma difusa ou para determinado seguimento social, cultural, étnico ou econômico (PARANÁ, [201-]). As políticas públicas correspondem a direitos assegurados constitucionalmente. O meio ambiente, por exemplo, é reconhecido como um direito de todos e a ele corresponde a Política Nacional do Meio Ambiente, instituída pela Lei Federal n.º 6.938 (BRASIL, 1981). A água é concebida na Carta da República como bem de uso comum.

Para proteger este bem e regulamentar seu uso múltiplo foi instituída a Política Nacional de Recursos Hídrico mediante a Lei Federal nº 9.433 (BRASIL, 1997).

As políticas públicas normalmente estão constituídas por instrumentos de planejamento, execução, monitoramento e avaliação, encadeados de forma integrada e lógica, segundo: 1 - Planos; 2 - Programas; 3 - Ações; 4 - Atividades (PARANÁ, [201-]). Os planos estabelecem diretrizes, prioridades e objetivos gerais a serem alcançados em períodos relativamente longos. Os programas estabelecem objetivos gerais e específicos focados em determinado tema, público, conjunto institucional ou área geográfica. Ações visam o alcance de determinado objetivo estabelecido pelo Programa, e a atividade, por sua vez, visa dar concretude à ação (PARANÁ, [201-]).

Os estudos de balanço hídrico, são ferramentas potenciais para auxílio a essas políticas públicas, incluindo-se o BHD/BHS. Calcular o BHC/BHS de forma distribuída, pode auxiliar o tomador de decisão à avaliar, planejar, monitorar e até mesmo criar cenários de uso do solo, aumentando as possibilidades de informação que podem dar suporte às políticas públicas, diferenciando regiões e possibilitando melhor adequação destas políticas às realidades de cada local.

Por exemplo, Montenegro e Montenegro (2012), apontam que um aquecimento das zonas semiáridas ao longo deste século, tende a acentuar eventos extremos, tanto de secas quanto de enchentes requerendo, assim, políticas públicas e diretrizes voltadas a um planejamento mais amplo e a um fortalecimento de ações participativas para controle, monitoramento e alerta. Os autores defendem que a governança das águas se deve basear em princípios de gestão compartilhada, descentralizada e de ampla participação pública e dos usuários.

Essa integração pode ser facilitada com avanço tecnológico. As inovações tecnológicas e científicas corroboram no sentido de construir ferramentas e meios plausíveis e confiáveis pela sociedade e, através deste esforço, levar propostas para os representantes políticos na elaboração de projetos que estejam em conformidade com a própria dinâmica do ambiente físico e também com seu padrão climático (NETO e SILVA, 2014).

Procurando tal representatividade de meio e padrão climático, Neto e Silva (2014) discutiram a aplicação de um software que calcula o BHC e o BHS nos postos com dados de chuva, que geram tabelas e gráficos dos dados de excesso e disponibilidade hídrica nestes pontos, possibilitando comparação entre esses pontos. Segundo os autores, com a inclusão de menos ou mais municípios (pontos), podem-se variar escalas pequenas até escalas maiores do espaço geográfico para buscar, assim, entender realidades e dinâmicas que não perpassam

apenas pelo plano atmosférico e climático em si, mas pelo plano social, podendo tal aplicabilidade de seus resultados promover políticas públicas nos municípios que mais sofrem com o déficit hídrico.

Esta tese visa discutir e apontar incertezas entre métodos de espacialização do BHC (e do BHS), permitindo não só um cálculo nos postos de coleta, mas um cálculo distribuído, também possibilitando sua adequação a diferentes escalas e apontando tendências para as regiões entre municípios (postos), expandindo as aplicações deste modelo nas políticas públicas.

Outra utilidade do BHC/BHS às políticas públicas é o seu uso para zonear áreas de risco climático para uma determinada cultura. Segundo EMBRAPA, ([200-]), o Zoneamento Agrícola de Risco Climático serve como um instrumento de política agrícola e de gestão de risco para seguro agrícola no Brasil.

As deficiências hídricas, associadas aos períodos de longa estiagem durante a estação chuvosa, são uma das principais causas das quebras de safras de grãos no Brasil e para que haja uma diminuição das perdas para os agricultores, tornou-se imprescindível identificar, quantificar e mapear as áreas mais favoráveis ao plantio das culturas de sequeiro, levando-se em consideração a oferta climática e a distribuição pluviométrica (EMBRAPA, [200-]).

Diante das adversidades climáticas e da interferência negativa que essas causam na produção agrícola e na economia do país, instituições de pesquisas passaram a partir da década de 70 a desenvolver no Brasil mecanismos que permitissem indicar, com maior margem de segurança, o local e a data mais apropriada para plantar determinada cultura, nas mais diversas regiões brasileiras, como também a cultivar mais adequada para cada região (EMBRAPA, [200-]). Dentre os principais mecanismos criados, pode ser citado o Zoneamento Agrícola de Risco Climático, Brasil (2016).

O Zoneamento Agrícola de Risco Climático considera em suas análises: a) o balanço hídrico (relação clima, solo e planta) e b) o risco quantificado, através de análises probabilísticas e de frequências e é indicado por município, tipo de solo e ciclo da cultivar (EMBRAPA, [200-]). Esse autor aponta dois problemas encontrados neste zoneamento: 1) os estudos não consideram informações referentes à microclimas; 2) a interpolação de dados.

Esses dois problemas apontados relacionam-se à representatividade espacial da informação gerada pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático e tem relação com a densidade de informação utilizada e dos métodos matemáticos utilizados nas interpolações. É de se esperar que uma densa malha de informação consiga expressar melhor os microclimas (ou se aproximar) e dar qualidade à interpolação destes dados.

O BHC/BHS calculado de forma distribuída pode trazer qualidade à esta representatividade espacial. Uma discussão sobre incertezas na espacialização do BHC (aplicadas também ao BHS) referente aos métodos utilizados nesta espacialização, dentre os quais a interpolação está contida, é realizada nesta tese, bem como uma discussão sobre as incertezas desta espacialização em referencia à densidade de informação utilizada na espacialização.

2.3 ESPACIALIZAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO

A modelagem espacializada tem se aprimorado cada vez mais devido ao crescimento do poder computacional, o que tem colaborado para o aumento da compreensão da física e da dinâmica de sistemas, em particular do sistema hidrológico (LIU e GUPTA, 2007). Isto tem proporcionado a construção de modelos com níveis mais elevados de complexidade, colaborando para uma migração de modelos concentrados e pontuais para modelos distribuídos (LIU e GUPTA, 2007).

Um exemplo claro disso é o BHC. Quando primeiramente desenvolvido por Thornthwaite (1948) e Thornthwaite e Mather (1955), era calculado em planilhas não eletrônicas. Hoje, a planilha eletrônica popularizou-se e é utilizada para realizar o cálculo do BHC referente a cada estação meteorológica (GARCIA, 2010; NEVES et al., 2011; COUTINHO e MORAIS, 2012). Já quando mais estações são consideradas nos cálculos e aliam-se a estes cálculos diferentes valores de CAD, o trabalho realizado pelas planilhas começa a ficar mais demorado e complicado devido à complexidade das interações previstas pelo modelo, pois cada planilha é montada conforme os dados de cada estação para cada valor de CAD, aumentando em muito o número de tabelas (CARVALHO NETO, 2011).

Para espacializar o BHC (em forma de mapas), tem-se duas alternativas. A primeira consiste em calcular os valores de BHC nas estações que medem precipitação e evapotranspiração (ou dados que permitam estimar a evapotranspiração) e depois espacializar os valores calculados de BHC, por meio de um método interpolador, como por exemplo a krigagem, splines, IDW, etc. A segunda alternativa é utilizar primeiro um método interpolador para espacializar as variáveis precipitação e evapotranspiração e depois, por meio de um artifício tecnológico, como a programação em ambiente SIG, calcular para cada célula o BHC (CECÍLIO et al., 2012; BECHINI et al., 2000).

Cecílio et al. (2012) e Bechini et al. (2000) chamaram a primeira alternativa como princípio cálculo-interpolação (CI) e a segunda como princípio interpolação-cálculo (IC) e

discutiram sobre a relevância da diferenciação entre tais princípios (CI e IC), pois a escolha do método influencia o resultado da espacialização. Esses autores concordam que o princípio IC é mais eficiente na representação espacial de modelos não lineares, como é o caso do BHC.

Uma discussão detalhada das tentativas de representar o BHC de forma espacializada e sobre a diferenciação entre o método IC e CI e suas influências e incertezas na espacialização do BHC estão contidas no Capítulo 5 desta tese.

2.4 ANÁLISE DE INCERTEZAS

Para se compreender o significado do termo "incerteza" utilizado neste trabalho, é interessante entender o que pode ser considerado como "certeza", pois Kundzewicz (2006) define incerteza como sendo, logicamente, o oposto de certeza. Para o autor, a certeza, baseada em metodologia científica, só pode ser alcançada frente à completa disponibilidade da informação.

Porém, ainda que se possua completa disponibilidade de informação, o resultado de uma medição, mesmo após correção para efeitos sistemáticos reconhecidos, ainda é apenas uma estimativa do valor do objeto medido, por causa da incerteza decorrente de efeitos aleatórios e da correção imperfeita do resultado para efeitos sistemáticos (JCGM, 2008),.

Considerando o exposto, pode-se compreender a certeza como sendo algo praticamente inalcançável, como uma certeza absoluta (JCGM, 2008), ou como o domínio pleno e integral da variável que se está representando, medindo ou avaliando pela completa disponibilidade de informação (KUNDZEWICZ, 2006).

De qualquer forma, por serem ambos, a certeza absoluta e o domínio pleno e integral de uma variável, de difícil (ou nula) possibilidade de serem atingidos, procura-se na compreensão das incertezas, a minimização de erros e a aproximação do que seria a certeza absoluta ou o domínio pleno e integral da variável que se quer representar, medir ou avaliar.

Tal ideia está em sincronia com JCGM (2008) que afirma que a incerteza do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento exato do valor da grandeza do objeto medido, ou seja, desconhecimento do que seria certeza ou domínio pleno e integral da variável que se quer representar, medir ou avaliar.

Explicando sobre incerteza, Kundzewicz (2006) faz uma comparação entre risco e incerteza considerando que quando se fala em risco, assume-se que existe uma distribuição de probabilidade para um determinado acontecimento, intimamente ligado às suas

consequências. Em outras palavras, o risco de uma variável aleatória ocorre quando se assume que a distribuição de probabilidade das saídas é existente, apoiada sobre um grupo consistente de pesquisas importantes (KUNDZEWICZ, 2006). Pode-se também entender risco como a chance aceita de que a variável seja maior (ou menor no caso de mínimos) que um determinado valor (TUCCI, 2005). Já quando se fala em incerteza, assume-se que existe uma ausência de informação e portanto não se sabe nada, ou se sabe pouco sobre este determinado acontecimento (KUNDZEWICZ, 2006).

Pode-se também diferenciar os conceitos de erro e de incerteza. Para Moreiras (2005), erro é definido como a diferença entre um resultado (estimativa) da aplicação de um modelo e o valor verdadeiro da medição e portanto, o erro é um valor único. A princípio, o valor de um determinado erro pode ser aplicado na correção de um resultado. A incerteza, por outro lado, toma a forma de uma gama de valores (distribuição). Para o autor, os fenômenos que contribuem para a incerteza e, portanto, para o fato de que o resultado da medição não pode ser caracterizado por um único valor, são chamados fontes de incerteza.

A palavra "incerteza", segundo JCGM (2008), significa dúvida e, portanto, no seu sentido mais amplo, "incerteza de medição", significa dúvida sobre a validade do resultado de uma medição. Por causa da falta de palavras diferentes para este conceito geral de incerteza e as quantidades específicas que fornecem medidas quantitativas deste conceito, por exemplo, o desvio padrão, é necessário utilizar a palavra "incerteza" para os dois sentidos.

Geralmente para um dado conjunto de informações, subentende-se que a incerteza de medição está associada a um determinado valor atribuído ao objeto medido (BIPM et al., 2008; IPQ e INMETRO, 2012). Uma modificação deste valor resulta numa modificação da incerteza associada (IPQ e INMETRO, 2012).

IPQ e INMETRO (2012) definem incerteza (de medição) como um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um objeto medido, com base nas informações utilizadas. A incerteza de medição inclui componentes provenientes de efeitos sistemáticos, tais como componentes associadas a correções e a valores atribuídos a padrões. Este parâmetro pode ser, por exemplo, um desvio-padrão denominado incerteza-padrão (ou um de seus múltiplos) ou a metade da amplitude de um intervalo tendo uma probabilidade expandida determinada.

Segundo IPQ e INMETRO (2012), a incerteza de medição geralmente engloba muitas componentes. Algumas delas podem ser estimadas por uma avaliação de Tipo A da incerteza de medição, a partir da distribuição estatística dos valores provenientes de séries de medições e podem ser caracterizadas por desvios-padrão. As outras componentes, as quais podem ser

estimadas por uma avaliação de Tipo B da incerteza de medição, podem também ser caracterizadas por desvios-padrão estimados a partir de funções de densidade de probabilidade baseadas na experiência ou em outras informações.

A avaliação de tipo A da incerteza de medição é a avaliação de uma componente da incerteza de medição por uma análise estatística dos valores medidos, obtidos sob condições definidas de medição. A avaliação de tipo B da incerteza de medição é a avaliação de uma componente da incerteza de medição determinada por meios diferentes daquele adotado para uma avaliação de tipo A da incerteza de medição. São alguns exemplos de avaliação que contém incertezas do tipo B de medição, baseada na informação: associada a valores publicados por autoridade competente; associada ao valor de um material de referência certificado; obtida a partir de um certificado de calibração; obtida a partir da classe de exatidão de um instrumento de medição verificado; obtida a partir de limites deduzidos da experiência pessoal (IPQ e INMETRO, 2012). Em outras palavras, incertezas do tipo B são obtidas de forma indireta.

A finalidade do tipo A e do tipo B de classificação é indicar as duas maneiras diferentes de avaliar os componentes da incerteza e gerar conveniência na discussão. Esta classificação não se destina a indicar que exista qualquer diferença na natureza dos componentes resultantes dos dois tipos de avaliação. Ambos os tipos de avaliação são baseados em distribuições de probabilidade e os componentes de incerteza resultantes de ambos os tipos são quantificados por variâncias ou desvios padrão (JCGM, 2008).

Quando se busca a representação da natureza por modelagem, a dependência de tais modelos à "completa disponibilidade da informação" (KUNDZEWICZ, 2006) representa uma fonte de incertezas. Segundo Cruz (2001), os modelos constituem uma concepção intelectual para reproduzir um sistema com a finalidade de representar e entender o comportamento da natureza, podendo-se também prever condições diferentes das observadas. Segundo a autora, por se tratar da representação da natureza, há perdas de informações e a utilização de um número reduzido de informações disponíveis na natureza, no modelo, introduz muitas incertezas nos métodos hidrológicos.

A modelagem hidrológica tem se beneficiado de uma evolução significativa ao longo das últimas décadas, incluindo o grande crescimento do poder computacional, cada vez mais aumentando a disponibilidade de observações hidrológicas distribuídas, melhorando a compreensão da física e dinâmica do sistema hidrológico (LIU e GUPTA, 2007). Isto levou à construção de modelos hidrológicos com níveis mais elevados de complexidade, e uma evolução dos modelos tidos como "aglomerados" (concentrados) e conceituais para modelos

distribuídos e semidistribuídos, baseados na física (LIU e GUPTA, 2007). Paradoxalmente, enquanto estes avanços refletem a nossa compreensão crescente, eles têm também aumentado a necessidade de métodos concretos para lidar com o aumento da incerteza associada aos próprios modelos, e às observações necessárias para a condução e avaliação dos modelos (LIU e GUPTA, 2007).

Condiciona-se a esse aumento da capacidade de modelar, considerando as limitações dos métodos, a baixa disponibilidade de dados e outros tipos de limitações, o uso do princípio da parcimônia, que é a busca da representação adequada de um sistema, por um modelo, com o menor número possível de parâmetros (TUCCI, 2005). Porém é muito importante procurar compreender possíveis fontes de incerteza nestes modelos, pois ao mesmo tempo que poucos parâmetros podem não ser suficientes para uma representação de um sistema de forma satisfatória, muitos parâmetros podem carregar mais incertezas para o modelo, reafirmando a necessidade da parcimônia na modelagem.

Tal evolução e crescimento do poder computacional permite a análise de incertezas em modelos voltados à simulações climáticas, como é o caso do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) espacializado (distribuído) e também de outros modelos. Como o BHC é o reflexo da interação entre a precipitação, a evapotranspiração e uma variável representante do solo, a CAD, é de se esperar que todos os meios utilizados para estimar cada um desses elementos, aporem incertezas para dentro do modelo.

Um exemplo de avaliação de incertezas associadas às condições climáticas simuladas por meio de um modelo climático global (Eta CPTEC/HadCM3) a partir de dados de precipitação, evapotranspiração e vazão da bacia (do rio Ijuí, RS), foi realizada por Oliveira et al. (2015). Os autores concluíram que as incertezas dos cenários de precipitação do modelo são muito superiores aos cenários de evapotranspiração. A imprecisão na estimativa da precipitação gera certo grau de inconsistência também nas vazões obtidas a partir do processo de modelagem hidrológica.

Já Santos et al. (2012) analisaram as alterações no Balanço Hídrico Climatológico (BHC) para o município de Ribeira do Pombal, BA, ocasionadas pelo aumento da temperatura média do ar. Para isso, os autores utilizaram dados mensais da temperatura média do ar e dos totais pluviométricos referentes ao período de 1961-1990. Com estes dados, os autores realizaram o BHC segundo Thorthwaite e Mather (1955) considerando três cenários "C" climáticos: C1 - cenário atual (média de 1961-1990), C2 - cenário atual + 1,3°C e C3 - cenário atual + 3,8°C, o que altera os valores das estimativas da evapotranspiração. Para os três cenários climáticos, Santos et al. (2012) consideraram os mesmos valores de precipitação para

todos os casos analisados. Esta decisão, segundo os autores, se deu em função da grande variabilidade da precipitação entre os anos sob condições semiáridas do Nordeste brasileiro, e principalmente devido às grandes incertezas dos modelos climáticos em simular a precipitação para essa região sob ação dos futuros cenários de mudanças climáticas.

Enquanto Oliveira et al. (2015) verificaram em seus estudos que a precipitação é uma grande fonte de incerteza em modelos climáticos, Santos et al. (2012) prevendo essa possibilidade, desconsideraram esta fonte de incerteza em suas análise, focando apenas na influência da temperatura.

Wang e Paegle (1996) identificaram que as incertezas nas análises do vento foram os maiores problemas encontrados em seu trabalho. Esses autores estudaram o impacto das incertezas no fluxo de umidade atmosférico em uma região montanhosa do norte dos Estados Unidos e nos Andes, concluindo que as fontes de erro mais significativas eram do modelo de elevação da superfície, das lacunas nos registros de dados e as incertezas no vento e nas análises de umidade.

Uma estratégia vastamente utilizada (SANTOS et al., 2012, ORLANDINI et al., 2011; D'ANGIOLELLA et al., 2005; GARCIA, 2010; RIO GRANDE DO SUL, 2010b; NEVES et al., 2011; FREITAS et al., 2011; CECÍLIO et al., 2012; PEREIRA, 2012; SILVA et al., 2011; SILVA et al., 2012; COUTINHO e MORAIS, 2012) para análise do BHC em uma região é utilizar a CAD com um único valor, comumente 100 mm, isolando-se assim esta variável e considerando assim o solo como uma parte menos influente na análise, praticamente desconsiderada. Essa prática se aplicada com o objetivo de isolar as incertezas referentes a variável do solo, e avaliar o BHC exclusivamente como função da precipitação e da evapotranspiração, útil para comparar regiões e caracterizá-las conforme o clima ou as classificações de Thornthwaite e Mather (1955). Para outros objetivos, uma consideração de valor generalizado para o CAD pode, ao invés de diminuir, aumentar muito as incertezas, principalmente quando se pensa em balanço para culturas.

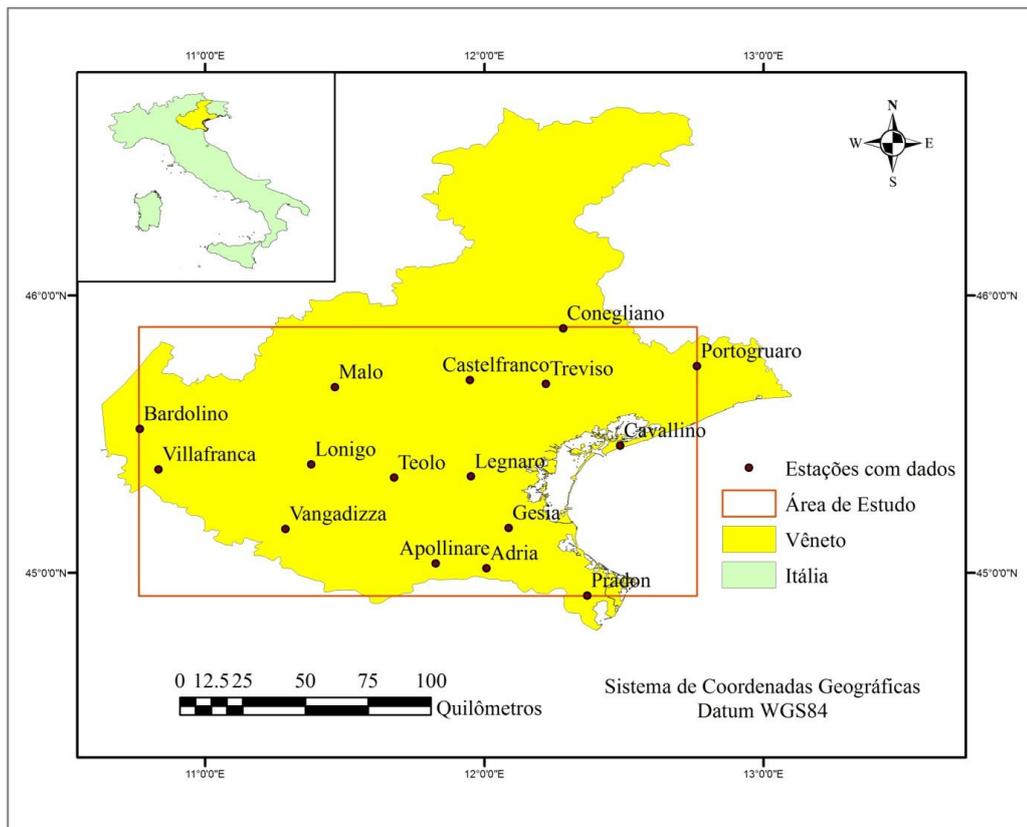
Assim, quando se quer avaliar o BHC para diferentes cenários de culturas e/ou tipos de solo, ou seja, para avaliar cenários de variação de uso do solo, como por exemplo em estudos de zoneamentos para culturas, utiliza-se os valores de CAD variando conforme o uso e o tipo de solo local, como empregado por Valeriano e Picini (2003), Cardoso (2005), Rio Grande do Sul (2007), Rio Grande do Sul (2010a), Santos et al. (2013), Lucas et al. (2015) e Carvalho Neto (2011).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo foi a planície de Vêneto, Região da Itália, sem considerar as áreas montanhosas do norte da região, características dos Alpes (Figura 1).

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Próprio autor.

Tal área foi escolhida por proporcionar uma densidade de informação capaz de suprir as necessidade de simulações realizadas nesta tese e dar suporte às discussões. Uma apresentação e uma descrição mais detalhada desta área de estudo, com gráficos e figuras ilustrando a localização, os dados e as variáveis utilizadas, se encontram nos capítulos 5 e 6 desta Tese.

Os dados utilizados nesta tese são oriundos da *Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto* (ARPAV, 2014), Itália, obtidos em 2014. Foram selecionadas as estações com dados disponíveis para as análises (precipitação, umidade

relativa, velocidade do vento e temperatura). As estações selecionadas foram 16 e a relação completa das estações e respectivos períodos de dados utilizados para o desenvolvimento do estudo encontram-se na Tabela 3 e podem também ser encontrados em Materiais e Métodos nos capítulos 5 e 6 desta tese. O período dos dados utilizados compreende de 01/01/1992 a 31/12/2012 (21 anos).

O processamento dos dados se deu em *datum* WGS84 e os rasters gerados são de resolução espacial de 500 x 500 metros, por meio do Programa ArcGIS® (ESRI, 2014).

Neste estudo foram utilizados como métodos de espacialização a interpolação por Krigagem (ordinário, semivariograma esférico) e pelo Inverso do Quadrado da Distância ou Inverso da Potência das Distâncias, do inglês *Inverse Distance Weighting* (IDW), com a finalidade de escolha do melhor interpolador.

A linguagem de programação Python™ (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2014) com o *package* ArcPy®, foi utilizada para a criação do algoritmo de integração das variáveis inerentes ao BHC, seguindo o que foi proposto por Thornthwaite e Mather (1955) e apresentado no Capítulo 4.

Tabela 3 - Estações utilizadas no estudo e período com dados

Estação	Código*	Lat°	Long°	Período com dados selecionados	
				Precipitação, Temperatura e UR**	Vento
Adria	115	45.02	12.01	19/02/1992 a 31/12/2012	01/08/2003 a 31/12/2012
Apollinare	231	45.03	11.83	01/01/1998 a 31/12/2012	12/08/2003 a 31/12/2012
Bardolino**	118	45.52	10.77	01/01/1992 a 31/12/2001	01/01/1992 a 31/12/2012
Castelfranco	102	45.69	11.95	04/02/1992 a 31/12/2012	18/05/1992 a 31/12/2012
Cavallino	160	45.46	12.49	01/02/1992 a 31/12/2012	01/02/1992 a 31/12/2012
Conegliano	100	45.88	12.28	19/02/1992 a 31/12/2012	19/02/1992 a 31/12/2012
Gesia	178	45.16	12.09	02/01/1996 a 31/12/2012	01/04/1998 a 31/12/2012
Legnaro	111	45.35	11.95	06/02/1992 a 31/12/2012	22/09/2001 a 31/12/2012
Lonigo	105	45.39	11.38	01/01/1992 a 31/12/2012	01/01/1992 a 31/12/2012
Malo	134	45.67	11.46	01/04/1992 a 31/12/2012	02/07/1992 a 31/12/2012
Portogruaro	159	45.75	12.76	01/02/1992 a 31/12/2012	01/02/1992 a 31/12/2012
Pradon	101	44.92	12.37	01/01/1992 a 31/12/2012	01/01/1992 a 31/12/2012
Teolo	170	45.34	11.68	19/02/1992 a 31/12/2012	19/02/1992 a 31/12/2012
Treviso	220	45.68	12.22	01/03/2002 a 31/12/2012	01/03/2002 a 31/12/2012
Vangadizza	131	45.16	11.29	01/01/2002 a 31/12/2012	01/01/2002 a 31/12/2012
Villafranca	104	45.37	10.83	01/01/1992 a 31/12/2012	07/05/1992 a 31/12/2012

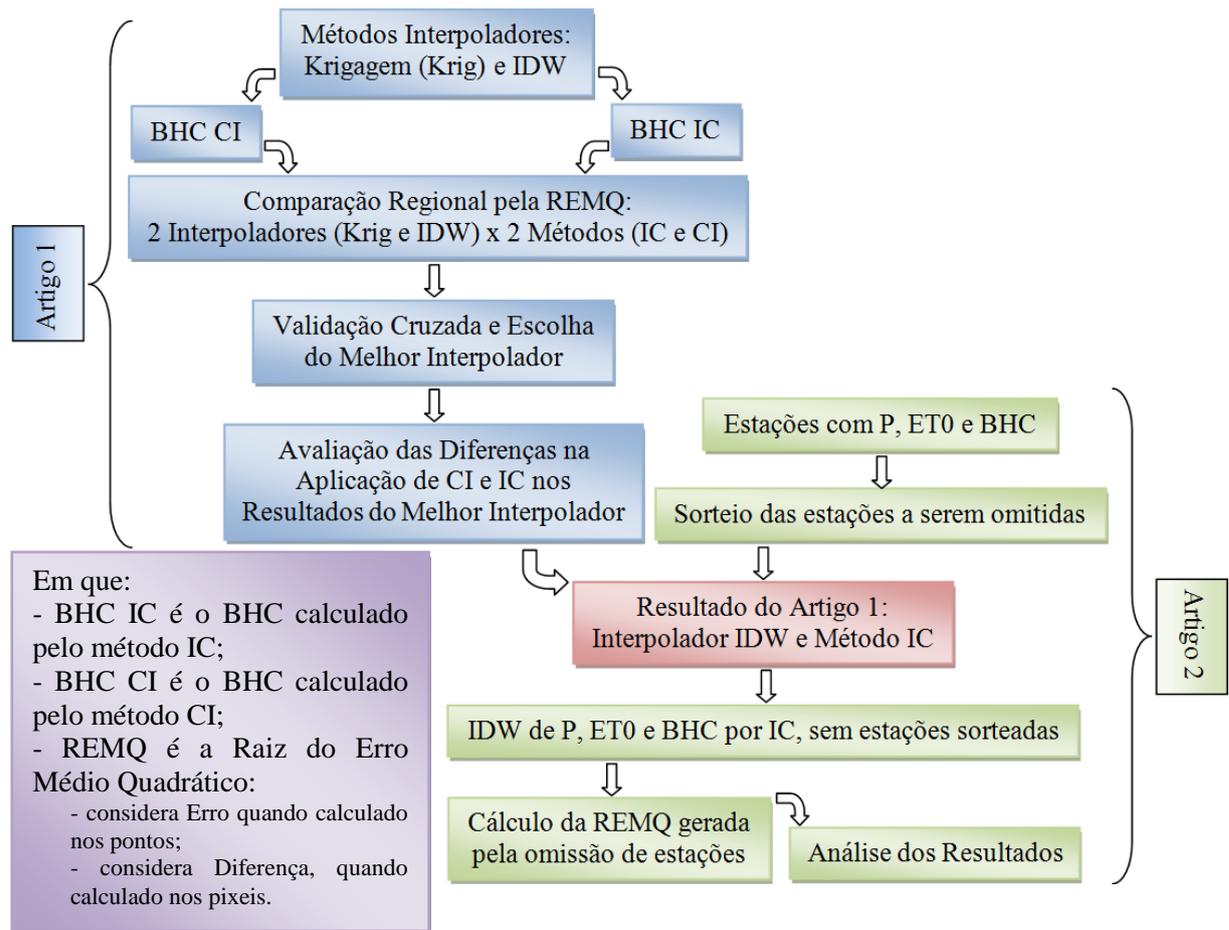
Fonte: Próprio autor.

* Identificação referente à ARPAV; ** Para Umidade Relativa (UR), Bardolino teve período de 01/01/1992 a 31/12/2012.

3.2 FLUXOGRAMA DE TRABALHO

Apresenta-se na Figura 2 um fluxograma geral de todo o trabalho realizado.

Figura 2 - Fluxograma de trabalho da tese.



Fonte: Próprio autor.

A pesquisa visa analisar as diferenças entre dois métodos de espacialização do BHC. O primeiro método, chamado Cálculo-Interpolação (CI), calcula o BHC nas estações que possuem os dados para tal e depois, por meio de métodos interpoladores, espacializa esses resultados de balanço nas áreas entre estações. O segundo, chamado Interpolação-Cálculo (IC), interpola primeiro as entradas do modelo, precipitação e evapotranspiração, e depois calcula o balanço em cada pixel.

Essa pesquisa também visa analisar a influência da densidade de estações utilizadas para essa espacialização. Para isso, a pesquisa seguiu as etapas, contidas na Figura 2, divididas em dois artigos científicos.

No Artigo 1, presente no Capítulo 5, discutem-se as diferenças entre os métodos CI e IC, seguindo as seguintes etapas: - considerando dois métodos interpoladores (krigagem e IDW), ambos os métodos (CI e IC) de espacialização do BHC foram empregados e uma comparação regional entre os métodos foi realizada, pela diferença entre os mapas gerados e teste estatístico (teste t); - realização de validação cruzada para escolher o melhor interpolador para a precipitação e a evapotranspiração; - análise dos erros gerados nas estações, por validação cruzada dos valores de balanço (BHC) e teste estatístico (teste t) para identificar a qualidade dos dois métodos. Maiores detalhes estão no Capítulo 5.

No Artigo 2, Capítulo 6, analisa-se a influência da densidade de estações na espacialização do BHC com as seguintes etapas: - sorteio das estações para serem omitidas nos processos de espacialização das variáveis; - utilizando somente o melhor interpolador, identificado no Artigo 1 (Capítulo 5), a precipitação, a evapotranspiração e o BHC foram espacializados sem a presença das estações omitidas (definidas por sorteio); - análise dos resultados pelo confronto dos valores de BHC calculados nas estações, com os valores de BHC estimados para as estações omitidas por sorteio

Considerando a análise das incertezas advindas da densidade das informações, foram considerados os erros pontuais, em mm, e depois, utilizou-se a estatística Raiz do Erro Médio Quadrático (REM_Q), que é um indicativo estatístico utilizado para comparação de erros, equivalente ao erro médio. Pelo fato do BHC gerar valores positivos e negativos em um mesmo mês, conforme a estação, considera-se a REM_Q, em mm, desconsiderando-se o uso do erro médio nas análises, pelo fato deste indicador (erro médio) anular valores positivos e negativos em sua média, mascarando resultados para o contexto deste trabalho. Maiores detalhes dos métodos encontram-se no Capítulo 6.

3.3 PREPARAÇÃO DOS DADOS BÁSICOS PARA O ESTUDO

Para o cálculo do Balanço Hídrico Climatológico - BHC são necessários dados de precipitação, de evapotranspiração e um dado representante da variável solo, a capacidade de água disponível (CAD). Considerando que se deseja, neste trabalho, compreender incertezas relacionadas às interpolações da precipitação e da evapotranspiração na espacialização do BHC, se fez fundamental isolar a variável CAD nas análises, valorando-a em 100 mm em todo o trabalho.

Os dados de precipitação e evapotranspiração foram trabalhados para representarem as normais climatológicas de cada variável utilizada, seguindo a metodologia do BHC de

Thornthwaite e Mather (1955), ou seja, valores médios de cada variável para cada mês do ano. A umidade relativa, velocidade do vento e temperatura foram utilizadas para estimar a evapotranspiração, calculada pelo método de Penman-Monteith simplificado (ALLEN et al., 1998).

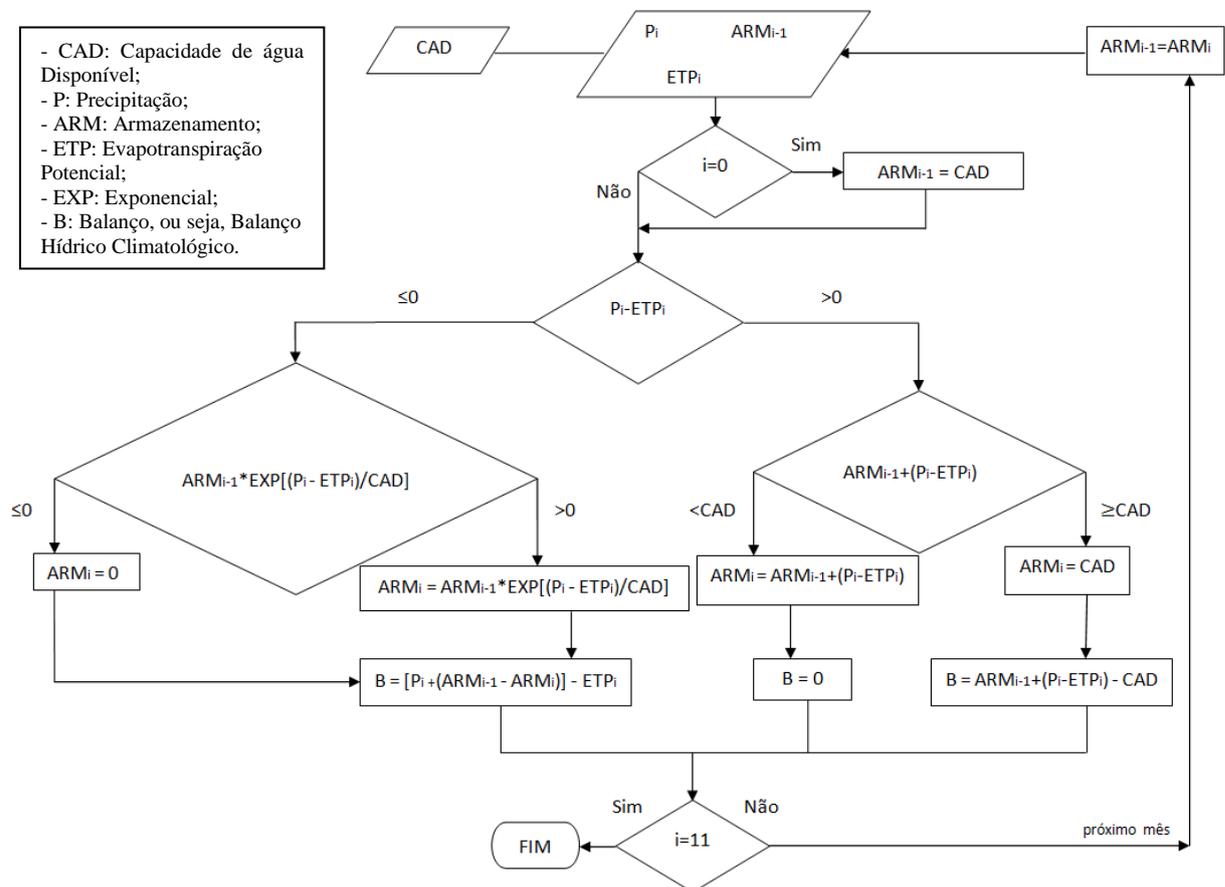
Considerou-se em toda a tese a evapotranspiração de referência (ET_o). O método de Penman-Monteith simplificado (ALLEN et al., 1998) também é referido como procedimento alternativo para cálculo do ET_o para situações onde algumas variáveis climáticas estejam faltando. No método de Penman-Monteith simplificado (ALLEN et al., 1998) os parâmetros são obtidos com base nas temperaturas mínimas e máximas, nas coordenadas geográficas (latitude e longitude) e na altitude.

Utilizou-se da ET_o, uma evapotranspiração referência, ou seja, um padrão referente a um cultivo único no solo, uma gramínea com 0,12 m de altura, uniformemente distribuído, adequadamente regado e ativamente em crescimento, conforme Allen et al. (1998). Da mesma forma que a variável CAD foi isolada nas análises, a ET_o foi considerada como a referência dos estudos, isolando-se a interferência da variabilidade em função do cultivo, da profundidade de raiz ou do tipo de solo específico para o cálculo da incerteza no método de espacialização das variáveis e do próprio balanço.

4 FERRAMENTA RASTER PARA CÁLCULO DO BHC

Buscando viabilizar a análise do Balanço Hídrico Climatológico (BHC), calculado distribuído espacialmente ao nível de pixel, e suas incertezas, criou-se uma ferramenta, em linguagem de programação PythonTM (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2014) utilizando do *package* ArcPy[®] para ser utilizada no software ArcGIS[®] (ESRI, 2014). Foi concebido algoritmo para a integração das variáveis inerentes ao BHC, conforme o fluxograma da Figura 3, que representa o modelo proposto por Thornthwaite e Mather (1955).

Figura 3 – Fluxograma do Modelo do Balanço Hídrico Climatológico (BHC).



Fonte: Próprio autor.

No fluxograma da Figura 3, CAD é a Capacidade de Água Disponível espacializada em raster, P_i é o raster de precipitação referente ao mês i , ETP_i é o raster de evapotranspiração do mês i , ARM_i é o armazenamento de água no solo no mês i , ARM_{i-1} é o armazenamento de água no solo no mês anterior a i e B_i é o balanço (BHC) resultante do mês

i. O valor de i varia de zero a 11, sendo zero o primeiro mês que iniciará os cálculos, mês este escolhido pelo usuário da ferramenta, diretamente no *script*.

As entradas do modelo são: o raster de CAD, 12 rasters de P e 12 rasters de ETP, referentes a cada mês do ano, espacializados com o mesmo tamanho e número de pixels, todos em unidade mm.

Neste trabalho, os rasters de P e ETP são resultados de interpolação dos valores obtidos nas estações climatológicas com dados, enquanto que o CAD é um raster em que todas as células possuem o valor de 100 mm. Vale ressaltar que a ferramenta foi elaborada para possibilitar a utilização das variáveis de entrada obtidas de diferentes formas. Por exemplo, a ETP neste trabalho foi calculada como a ETo, mas poderia ter sido calculada conforme o tipo de cultivo. Já os valores de CAD, podem variar conforme o solo e cultura, a fim de representarem diversas realidades, conforme o objetivo do estudo do usuário.

Nos cálculos, a ferramenta identifica o déficit hídrico quando o resultado do balanço P-ETP for negativo para o mês em questão, ou seja, a entrada de água no sistema é insuficiente para que planta atinja pleno desenvolvimento e conseqüentemente, precisa recorrer ao armazenamento de água no solo. Neste caso, há o deplecionamento do reservatório no solo, o qual ocorre segundo uma equação de decaimento exponencial.

O excesso hídrico é tido pela ferramenta quando a entrada de água no sistema é suficiente para suprir a demanda hídrica vegetal daquele mês, gerando excedente que ultrapassa o limite máximo de armazenamento do solo.

Quando o mês anterior teve déficit, existe uma possibilidade de resultado simulado pela ferramenta, em que o balanço é zero, ou seja, não existe déficit de oferta hídrica para a planta, porém também não existe excesso de oferta hídrica a ponto de resultar valores positivos. Isto ocorre quando a entrada de água no sistema é suficiente à demanda hídrica vegetal, gerando um excedente que não ultrapassa o limite máximo de armazenamento do solo, gerando assim uma pequena recarga à armazenagem no solo.

Desta forma, para os cálculos do BHC, sempre é necessário saber a situação do armazenamento de água do solo no mês anterior e, devido a isso, é orientado que se comecem os cálculos em um mês que se tem a certeza que o armazenamento do solo no mês anterior é máximo (=CAD). Só então é feita a primeira análise (pergunta) se P-ETP é maior ou menor que 0. Este trabalho começou os cálculos pelo mês de janeiro, inverno na Itália.

Para $P_i - ETP_i > 0$, se a situação do armazenamento do solo no mês anterior (ARM_{i-1}) for máxima, o balanço será o resultado de $B_i = P_i - ETP_i$, conformando excesso hídrico. O armazenamento do solo continuará máxima, ou seja, $ARM_i = CAD$. Caso

$ARM_{i-1} \neq CAD$, então $ARM_i = ARM_{i-1} + (P_i - ETP_i)$. Se ARM_i ficar maior que CAD , então será igual a CAD , que é o limite máximo do reservatório (solo).

Utilizou-se a equação proposta por Pereira (2005) que, simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955), demonstrou que, para se calcular o armazenamento do solo em situação de $P_i - ETP_i < 0$, pode-se usar a Equação 1:

$$ARM_i = ARM_{i-1} * \text{EXP}[(P_i - ETP_i)/CAD] \quad (1)$$

em que:

EXP refere-se a uma função exponencial, base e.

Considerando que a ETR_i é estimada pela retirada de água que a planta efetuou do reservatório em referência a quantidade existente no mês anterior, usa-se a Equação 2 para estimar tal variável:

$$ETR_i = [P_i + (ARM_{i-1} - ARM_i)] \quad (2)$$

Neste caso, o balanço é o resultado de $B_i = ETR_i - ETP_i$, conformando déficit hídrico.

As saídas geradas pela ferramenta são: 12 rasters de balanço (BHC, neste trabalho) e 12 mapas de ARM, um para cada mês e todos em unidade mm. Se os valores do BHC são negativos, são de déficit. Já se são positivos ou nulos, são de excesso.

É possível criar cenários de P, ETP ou CAD para uma determinada região e rodar o modelo. Esta ferramenta possibilita a comparação rápida e fácil entre cenários de diferentes cultivos em um mesmo terreno, analisando suas relações com a hidrologia local e identificando em que região da bacia ou área e em qual posição no ano há viabilidade de implantação de determinadas culturas, proporcionando a utilização do BHC, por exemplo, como uma variável em análises de viabilidade de projetos agroflorestais em diferentes escalas.

Além disso, é possível utilizar essa ferramenta para o cálculo sequencial de balanço hídrico (BHS), porém, com alguns ajustes na programação, uma vez que as lógicas de cálculo entre BHC e BHS são iguais, diferenciando-se as escalas temporais.

5 ARTIGO 1 - AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ESPACIALIZAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO EM ESCALA REGIONAL

Resumo

O Balanço Hídrico Climatológico (BHC), quando espacializado, pode conter incertezas relacionadas aos métodos utilizados para esta representação regional. O objetivo deste artigo é identificar incertezas nos resultados da espacialização do BHC em função de dois métodos. O primeiro método consiste em calcular o BHC pontualmente (na estação) e, depois, espacializá-lo por interpolação desses pontos (princípio Cálculo-Interpolação, CI). O segundo método consiste em interpolar cada variável do BHC primeiro (precipitação e evapotranspiração) e, depois, calculá-lo para cada pixel (princípio Interpolação-Cálculo, IC). A área de estudo desse trabalho foi a planície de Vêneto, Região da Itália. Os dados de precipitação (P) e evapotranspiração (ET_o) foram espacializados por Krigagem (ordinário, semivariograma esférico) e Inverso do Quadrado da Distância (IDW). Criou-se uma ferramenta, em linguagem de programação PythonTM, utilizando o *package* ArcPy[®], que possibilitou a geração do algoritmo de integração das variáveis inerentes ao BHC, possibilitando as análises do método IC. Este estudo não foi baseado em "verdade de campo", mas as incertezas referentes aos métodos de espacialização do BHC basearam-se em: 1) diferença entre métodos na representação do BHC nas áreas entre estações; 2) erros gerados pelos diferentes métodos, pontualmente nas estações, em referência aos valores de BHC calculados com os valores medidos de P e ET_o destes locais. A comparação entre os dois métodos de espacialização do BHC, IC e CI, para as áreas entre estações se deu de quatro maneiras (4 análises), segundo os interpoladores envolvidos. Cada análise se deu pela comparação entre um raster de BHC feito célula à célula e outro raster de BHC obtido pela interpolação dos BHC calculados para cada estação. Para cada comparação foi calculada a estatística "Raiz do Erro Médio Quadrático (REM_Q)" das diferenças entre os mapas gerados, considerando as diferenças de todos os pixels e colocados em gráfico para serem analisados. Já a comparação entre os dois métodos, IC e CI, no cálculo do BHC nas estações se deu por validação cruzada. A espacialização do BHC por IC se mostrou mais adequado para escalas menores (áreas maiores), uma vez que cada cálculo é aplicado célula a célula, enquanto que CI não prevê tal cálculo nas áreas entre estações, trazendo incertezas à espacialização, em especial quando existe déficit hídrico no BHC e/ou recarga do solo por suavizar tais valores de balanço entre estações, não calculando propriamente o BHC nestas áreas. As análises demonstraram que a redução de incertezas promovida pelo método IC em relação ao CI, não apresentaram significância estatística, ao nível de 5%. Porém, considerando que IC permite a espacialização do BHC conforme diferentes cenários de Capacidade de Água Disponível (CAD), o que não é viável com o método CI, pode-se considerar que esse método proporciona mais opções de aplicação do BHC, possibilitando a geração de cenários de culturas de forma mais rica e dinâmica que o método CI, inclusive considerando os diferentes tipos de solos de uma região de estudo. Ficou também evidente a importância da escolha do método interpolador, visando à maior qualidade da representação espacial do BHC. Portanto, conclui-se pela indicação do método IC para a geração de cenários de espacialização do BHC, assim como recomenda-se sempre a avaliação de diferentes interpoladores para as variáveis, por validação cruzada, para a minimização de incertezas.

Palavras-Chave: Balanço Hídrico Climatológico. BHC. Déficit Hídrico. Excesso Hídrico. Interpolação. Balanço Hídrico Espacializado. Thornthwaite. IDW.

EVALUATING SPATIALIZATION METHODS FOR THE CLIMATIC WATER BALANCE AT REGIONAL SCALE

Abstract

The Climatic Water Balance (CWB), when spatialized, may contain uncertainties related to the methods used for its regional representation. The purpose of this paper is to identify the uncertainties in the CWB's spatialization results regarding two methods. The first method is to calculate the CWB punctually (at the station) and then to spatialize it by interpolating these points (Calculation-Interpolation principle, CI). The second method is to interpolate each CWB's variable first (precipitation and evapotranspiration) and then calculate it for each pixel (Interpolation-Calculation principle, IC). The study area of this paper was the flat area of Veneto, Italy. The precipitation (P) and the evapotranspiration (ET_o) were spatialized by Kriging (ordinary, spherical semivariogram) and Inverse Distance Weighting (IDW). A tool in the Python™ programming language was created, using the ArcPy® package, which enabled the creation of an algorithm to integrate the CWB's variables, making possible the IC method analysis. This study was not based on "field truth", but the uncertainties regarding the CWB spatialization methods were based on: 1) difference between methods in the representation of the CWB in the areas between stations; 2) Errors generated by different methods, punctually at stations, in reference to the CWB values calculated with the measured values of P and ET_o at these sites. The comparison between the two spatialization methods for the CWB, CI and IC, for the areas between stations, occurred in four ways (4 approaches), according to the interpolation methods involved. Each analysis was done by a comparison between a CWB raster done cell by cell and another CWB raster obtained by interpolating the calculated CWB in each station. For each comparison was calculated the Root Mean Square Error (RMSE), considering the difference of all pixels, then plotted in graph for analysis. The comparison between the CI and the IC method for the CWB calculation at the stations was done by cross-validation. The CWB's spatialization by IC was more suitable for smaller scales (bigger areas), since each calculation is applied cell to cell, while CI doesn't do it in the areas between stations, bringing uncertainties into the spatialization, in particular when there is water deficit and/or soil recharge, because it smoothes such balance values between stations, not properly calculating the CWB in these areas. The analysis showed that the reductions of uncertainties promoted by the IC method in relation to the CI, were not statistically significant at the 5% level. However, since IC allows the CWB spatialization according to different scenarios of Available Water Capacity (AWC), which is not feasible with the CI method, it can be considered that this method provides more options for the CWB's application, allowing the generation of crop scenarios in a richer and more dynamic way than the CI method, also considering the different soil types in a study area. The importance of the interpolating method's choice also became evident, aiming at the CWB highest quality of spatial representation. Therefore, we conclude to indicate the IC principle to generate spatializations' scenarios for the CWB, as well an evaluation of different interpolation methods, by cross-validation, to decrease uncertainty.

Keywords: Climatic Water Balance. CWB. Water Deficit. Water Surplus. Interpolation. Spatialized Water Balance. Thornthwaite. IDW.

5.1 INTRODUÇÃO

O balanço hídrico envolve a quantificação dos componentes de um determinado sistema hídrico, visando o melhor entendimento do seu comportamento, e baseia-se no princípio de conservação de massa, sendo analisado pelos insumos de entradas e pelas saídas de água do sistema (TUCCI e BELTRAME, 2009).

Visando equacionar essas relações, surgiram diferentes métodos de se calcular o balanço hídrico em função do tipo de sistema e objetivo do estudo. Dentre estes, um que apresentou grande difusão foi o Balanço Hídrico Climatológico (BHC) de Thornthwaite e Mather (1955), o qual considera que a disponibilidade de água para a vegetação diminui exponencialmente à medida que o armazenamento de água no solo é reduzido, estabelecendo, assim, o solo como um ingrediente ativo no seu cálculo. Esse balanço hídrico é facilmente entendido como um método climático utilizado para estimar o teor de água existente no solo disponível à comunidade vegetal (D'ANGIOLELLA et al., 2005).

As abordagens metodológicas para a espacialização do BHC foram alteradas ao longo do tempo. Inicialmente, o balanço foi concebido para ser calculado de forma pontual, em função da existência de séries históricas das variáveis envolvidas no cálculo. Posteriormente, evoluiu para estimativas médias regionais com uso de polígonos de Thiessen e por técnicas de espacialização dos resultados dos pontos por diversos métodos interpoladores, chegando até aplicações de cálculo pixel a pixel. Exemplos destas abordagens metodológicas são apresentadas na revisão deste trabalho.

O objetivo deste artigo é identificar as incertezas nos resultados do BHC em função dos processos de espacialização aplicados, comparando duas formas: a primeira consiste em calcular o BHC pontualmente (na estação) e, depois, espacializá-lo por interpolação desses pontos (princípio Cálculo-Interpolação, CI); a segunda forma de espacialização do BHC consiste em interpolar cada variável do BHC primeiro e, depois, calculá-lo para cada pixel (princípio Interpolação-Cálculo, IC). Neste estudo utilizou-se como referência de verdade, os valores calculados pelo modelo nos pontos das estações climatológicas.

5.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Balanço Hídrico Climatológico (BHC) de Thornthwaite e Mather (1955) considera o solo como um reservatório que dificulta a saída da água à medida que vai secando. Nos períodos em que o total de precipitações (P) é menor que a evapotranspiração potencial

(ETP), a água retida se torna uma função dessa demanda potencial ($P - ETP < 0$) e da Capacidade de Água Disponível (CAD) adotada. Havendo uma sequência de períodos nessa condição, a água retida no solo será uma função sequencial dos valores negativos acumulados de $P - ETP$, ou seja, da perda potencial acumulada (PEREIRA, 2005).

O BHC, primeiramente, foi calculado com dados climáticos, em escala mensal e CAD generalizada de 100 mm, proporcionando comparação climática para os EUA (THORNTHWAITE, 1948). A perda de água pelo solo foi simulada de forma linear (VAREJÃO-SILVA, 2006). Já em 1955, Thornthwaite e Mather (1955) otimizaram a relação de perda de água pelo solo introduzindo uma função exponencial que simula o aumento da dificuldade de retirada de água do solo à medida que se aumenta a sua perda (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Porém, o BHC não possibilita apenas essa comparação entre regiões quando calculado sob uma CAD de valor único, variando-se apenas os dados climáticos de precipitação e evapotranspiração, como empregado por Orlandini et al. (2011), D'Angiolella et al. (2005), Garcia (2010), Rio Grande do Sul (2010b), Neves et al. (2011), Freitas et al. (2011), Cecílio et al. (2012), Pereira (2012), Silva et al. (2011), Silva et al. (2012) e Coutinho e Morais (2012), mas é também utilizado para diferentes escalas, em que a CAD pode ser variada conforme o uso e o tipo de solo local, como empregado por Valeriano e Picini (2003), Cardoso (2005), Rio Grande do Sul (2007), Rio Grande do Sul (2010a), Santos et al. (2013) e Lucas et al. (2015).

Até mesmo as escalas temporais de utilização do BHC são as mais variadas. Embora a escala mensal seja a forma original e comumente utilizada, o BHC pode ser calculado em escala diária (LUCAS et al., 2015), decenal (INMET, 2016; CARDOSO, 2005) ou em qualquer escala, conforme a disponibilidade dos dados, até mesmo anual (D'ANGIOLELLA et al., 2005; BANDOC; PRĂVĂLIE, 2015) ou mais, como em Leao (2014), que avaliou e mapeou 100 anos do comportamento do Índice de Umidade de Thornthwaite (obtido por meio do BHC) na Austrália, calculando tal índice de 20 em 20 anos para o período de 1913 a 2012.

Quando calculado para um determinado período de dados contínuos, o BHC é comumente chamado na literatura de Balanço Hídrico Sequencial (BHS), como em Lucas et al. (2015), INMET (2016) e Cardoso (2005). Esse balanço é feito em sequência, conforme a disponibilidade de dados, e é normalmente usado para um período bem delimitado e curto (conforme objetivo do trabalho), mas pode ser utilizado em grandes sequências de observações. Não representa, necessariamente, o comportamento climático de uma região, pois normalmente não é calculado com dados característicos de clima (ex: 30 anos de

observações), como é o BHC, mas para uma parte de um período (ex: do dia 20 de janeiro a 20 de junho).

Existem várias formas de representar espacialmente o BHC para uma região. Como o cálculo desse balanço está intimamente ligado ao solo e depende de dados de precipitação e evapotranspiração, a espacialização desse balanço também depende da espacialização da variável referente ao solo, neste caso, a CAD e das variáveis P e ETP.

Se o BHC contar com dados de P e ETP de apenas uma estação e a CAD possuir apenas um valor, o BHC pode ser apresentado em forma de gráfico, como Garcia (2010), que simulou a influência de mudanças climáticas no BHC em Ituverava, SP, e utilizou CAD de 100 mm e dados da estação local.

Já se existir maior riqueza na espacialização da CAD, mas com apenas uma estação de dados, o BHC pode ser representado regionalmente de acordo com a área de abrangência dessa estação, como fez Cardoso (2005), que regionalizou as deficiências hídricas e suas probabilidades em função da unidade de mapeamento do solo, ou seja, da CAD conforme o tipo de solo, na área de influência da estação.

Considerando um maior número de estações com dados de P e ETP, aumenta-se a complexidade da representação espacial do BHC, pois aumentam as formas de representação das variáveis inerentes a esse balanço.

Uma maneira de representar regionalmente a influência de uma estação meteorológica é o Polígono de Thiessen. Rio Grande do Sul (2007) utilizou o BHC como um dos parâmetros para o zoneamento ambiental para a atividade de silvicultura, espacializado por Polígono de Thiessen. Já Rio Grande do Sul (2010b) apresentou uma média de déficit ou excessos mensal e anual para cada estação meteorológica, não mais espacializando o BHC, mas apresentando os resultados de forma tabelar.

Carvalho Neto (2011), investigando o uso do BHC para subsidiar tomadas de decisão quanto ao manejo de bacias hidrográficas, também utilizou Polígonos de Thiessen na espacialização do BHC. O autor comentou sobre as dificuldades de executar o cálculo do BHC, por meio de planilha eletrônica, com objetivo de sua espacialização para uma região sob influência de 4 estações pluviométricas e 13 CADs diferentes. Como a planilha eletrônica realiza um cálculo do BHC para cada CAD e cada valor de precipitação e ETP por vez, para o exemplo foram necessárias 28 planilhas, o que inviabiliza a espacialização com o uso de precipitação e temperatura (ou ETP) interpoladas em Sistema de Informação Geográfica (SIG), devido ao elevado número de processamentos.

D'Angiolella et al. (2005) suprimiram essa dificuldade com a utilização de programação para calcular o BHC em cada uma das estações e, depois, utilizaram o método de interpolação Spline para espacializar os resultados, justificando tal escolha devido à valorização dos pontos originais pelo método.

Outros autores também procederam da mesma forma, calculando o BHC nas estações e, depois, espacializando por métodos interpoladores. Alguns exemplos podem ser conferidos como o trabalho de Sentelhas et al. (2008), que utilizaram Splines; como Freitas et al. (2011), que calcularam o BHC e interpolaram por Krigagem para as CAD analisadas (75, 100, 125 e 150 mm); e o caso de D'Angiolella e Silva (2004), que também utilizaram o método Krigagem de interpolação e geraram mapas das variáveis resultantes do BHC, como evapotranspiração real, deficiência e disponibilidade hídrica.

Porém, Cecílio et al. (2012) e Bechini et al. (2000) atentaram à necessidade de discussão sobre a relevância da diferenciação entre o princípio cálculo-interpolação (CI) e o princípio interpolação-cálculo (IC), pois a escolha do método influencia o resultado da espacialização. Esses autores concordam que o princípio IC é mais eficiente na representação espacial de modelos não lineares, como é o caso do BHC. Embora haja essa concordância entre eles, avaliaram os princípios CI e IC em modelos e aplicações diferentes.

Bechini et al. (2000) avaliaram um modelo de espacialização da radiação solar global no norte da Itália. Para tal, os autores discutiram a influência do princípio CI e IC no cômputo da transmissividade atmosférica (necessária para o modelo por eles utilizados) e no resultado final das simulações. Os resultados de Bechini et al. (2000) apresentaram um erro quadrático médio do princípio interpolação-cálculo superior ao erro quadrático médio do princípio cálculo-interpolação. Os autores explicaram esse comportamento devido ao fato de que seis *inputs* precisaram ser interpolados para os cálculos, aumentando, assim, o erro na aplicação do modelo, já que o cálculo-interpolação requereu apenas a interpolação da variável calculada, promovendo, nesse caso, um erro inferior. Segundo os autores, o princípio interpolação-cálculo pode ser aplicado somente se as entradas do modelo apresentam estrutura espacial e temporal confiáveis e de alta qualidade.

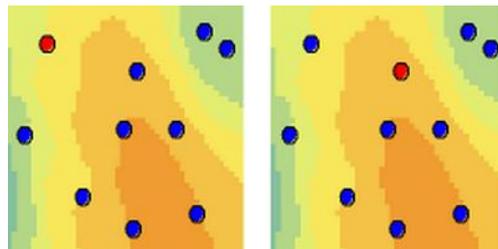
Já Cecílio et al. (2012) desenvolveram, com o software MATLAB, um método para calcular o BHC para cada pixel. Os autores fizeram suas simulações para o Estado do Espírito Santo, comparando tal método de espacialização com os resultantes da interpolação dos resultados do BHC nos postos com interpoladores krigagem e inverso de uma potência da distância (IDW), concluindo que o método do cálculo do BHC no pixel apresenta desempenho superior ao dos interpoladores avaliados, que interpolaram os valores de BHC.

Nota-se, assim, a importância da avaliação dos métodos interpoladores utilizados tanto no princípio interpolação-cálculo como no cálculo-interpolação, a despeito dos métodos de espacialização utilizados.

Essa avaliação pode ser feita pela validação cruzada (VARMA e SIMON, 2006; SENI e ELDER, 2010; KOHAVI, 1995; EFRON e TIBSHIRANI, 1997), que consiste em fazer a interpolação com todas as estações disponíveis e confrontar esse resultado com uma simulação da mesma interpolação, porém sem uma das estações, verificando, desse modo, o erro pontual gerado pelo interpolador no exato local da estação retirada na simulação. Bechini et al. (2000) e Cecílio et al. (2012) utilizaram a validação cruzada nas avaliações de seus modelos. Franco e Uda (2015), Alves e Vecchia (2011) e Costa et al. (2012) avaliaram métodos interpoladores para espacializar a precipitação, por validação cruzada.

Na Figura 1, 10 pontos são usados para ilustrar o método da validação cruzada. O primeiro ponto vermelho é omitido na interpolação, que é realizada com os 9 pontos azuis. O valor estimado pela interpolação é confrontado com o valor real que foi omitido (ponto vermelho). Essa simulação é feita, então, para o segundo ponto vermelho e, assim, sucessivamente, até ser feita para cada uma das estações, resultando em estimativas de erro pontuais para cada estação.

Figura 1 - Ilustração da Validação Cruzada.



Fonte: ESRI (2014b).

5.3 MATERIAL E MÉTODOS

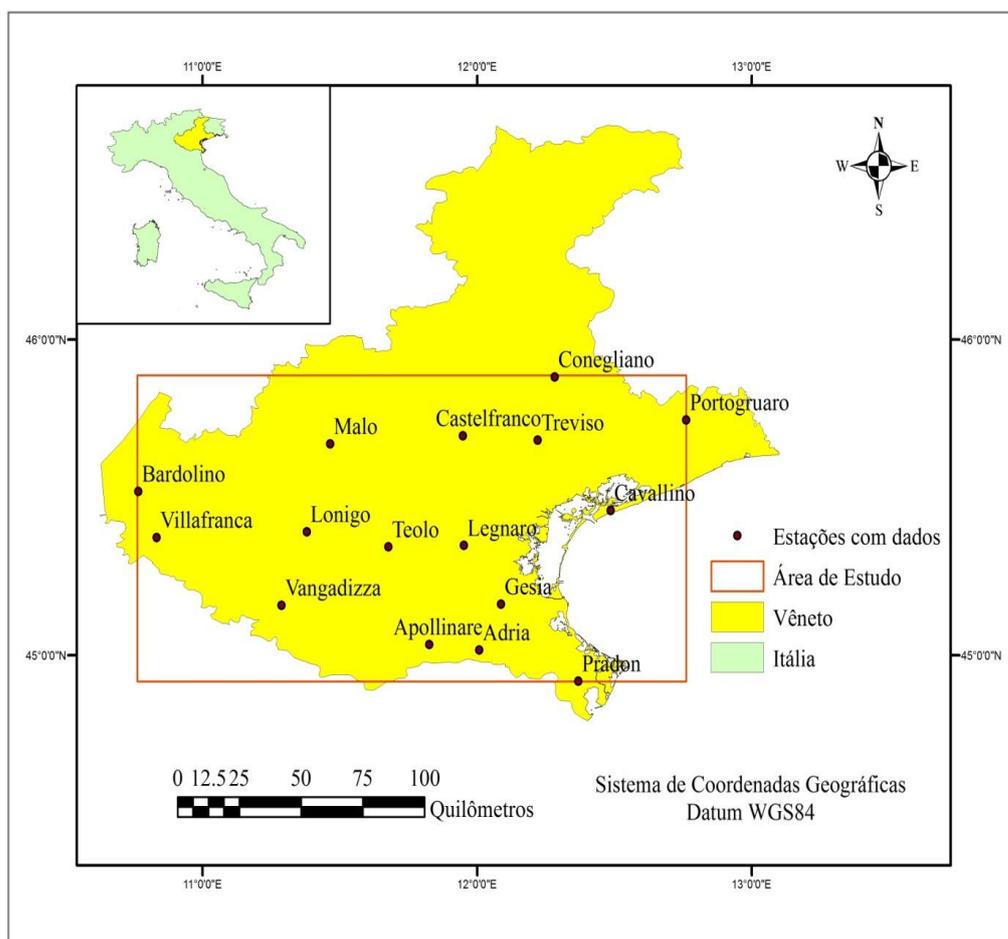
5.3.1 Área de Estudo

A área de estudo desse trabalho é a planície de Vêneto, Região da Itália. Utilizou-se desta área mais homogênea (área plana), para minimizar as incertezas advindas das altas altitudes dos Alpes ao norte da Itália.

Na planície de Vêneto prevalece um clima com um grau notável de continentalidade com invernos rigorosos e verões quentes. Mas o traço mais característico é a umidade elevada, especialmente nas áreas naturalmente irrigadas, o que torna o verão abafado e dá origem a nevoeiros frequentes e densos durante o inverno. A precipitação é distribuída de forma bastante equilibrada ao longo do ano, exceto no inverno, que é a estação mais seca (CHIAUDANI, 2008).

Os dados utilizados no trabalho são oriundos da *Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto* (ARPAV, 2014). Foram selecionadas as estações com dados disponíveis para as análises (precipitação, umidade relativa, velocidade do vento e temperatura). As estações que atenderam tais exigências foram 16 e estão na Figura 2 e na Tabela 1. De forma geral, o período dos dados utilizados vai de 01/01/1992 a 31/12/2012 (21 anos). Algumas estações possuem um período menor de observações por serem mais jovens. As estações, com os referidos períodos de observações, encontram-se na Tabela 1.

Figura 2 - Localização das estações climatológicas de Vêneto, Itália, utilizadas no trabalho.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 1 - Estações utilizadas no estudo e período com dados.

Estação	Código*	Lat°	Long°	Período com dados selecionados	
				Precipitação, Temperatura e UR**	Vento
Adria	115	45.02	12.01	19/02/1992 a 31/12/2012	01/08/2003 a 31/12/2012
Apollinare	231	45.03	11.83	01/01/1998 a 31/12/2012	12/08/2003 a 31/12/2012
Bardolino**	118	45.52	10.77	01/01/1992 a 31/12/2001	01/01/1992 a 31/12/2012
Castelfranco	102	45.69	11.95	04/02/1992 a 31/12/2012	18/05/1992 a 31/12/2012
Cavallino	160	45.46	12.49	01/02/1992 a 31/12/2012	01/02/1992 a 31/12/2012
Conegliano	100	45.88	12.28	19/02/1992 a 31/12/2012	19/02/1992 a 31/12/2012
Gesia	178	45.16	12.09	02/01/1996 a 31/12/2012	01/04/1998 a 31/12/2012
Legnaro	111	45.35	11.95	06/02/1992 a 31/12/2012	22/09/2001 a 31/12/2012
Lonigo	105	45.39	11.38	01/01/1992 a 31/12/2012	01/01/1992 a 31/12/2012
Malo	134	45.67	11.46	01/04/1992 a 31/12/2012	02/07/1992 a 31/12/2012
Portogruaro	159	45.75	12.76	01/02/1992 a 31/12/2012	01/02/1992 a 31/12/2012
Pradon	101	44.92	12.37	01/01/1992 a 31/12/2012	01/01/1992 a 31/12/2012
Teolo	170	45.34	11.68	19/02/1992 a 31/12/2012	19/02/1992 a 31/12/2012
Treviso	220	45.68	12.22	01/03/2002 a 31/12/2012	01/03/2002 a 31/12/2012
Vangadizza	131	45.16	11.29	01/01/2002 a 31/12/2012	01/01/2002 a 31/12/2012
Villafranca	104	45.37	10.83	01/01/1992 a 31/12/2012	07/05/1992 a 31/12/2012

Fonte: Próprio autor.

* Identificação referente à ARPAV; ** Para Umidade Relativa (UR), Bardolino teve período de 01/01/1992 a 31/12/2012.

Os dados de precipitação e evapotranspiração foram trabalhados para representarem as normais climatológicas de cada variável utilizada, seguindo a metodologia do BHC, ou seja, valores médios de cada variável para cada mês do ano. A evapotranspiração foi calculada pelo método de Penman-Monteith simplificado (ALLEN et al., 1998). Considerou-se no trabalho a evapotranspiração de referência (ET_o).

Na Tabela 2 e na Tabela 3 podem ser conferidas, respectivamente, as precipitações médias e as evapotranspirações potenciais médias (ET_o) de longo período para cada mês do ano, em cada estação, que caracterizam o clima da região. Na Figura 3 apresentam-se os mapas da espacialização das precipitações, interpoladas pelo método IDW.

Tabela 2 - Estações utilizadas no trabalho, e respectivos dados mensais médios de precipitação (P), em mm.

Precipitação (P) em mm												
Estação/Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Adria	32,2	46,3	49,9	65,5	64,5	58,0	47,5	59,7	74,9	78,2	72,4	56,9
Apollinare	33,1	45,0	49,2	71,1	85,3	54,3	45,8	54,1	62,8	84,5	79,5	56,4
Bardolino	48,6	19,8	46,3	71,7	79,7	70,2	59,5	68,6	103,7	115,1	83,4	60,3
Castelfranco	52,9	65,8	66,3	96,5	129,0	111,4	92,2	95,7	126,9	112,8	147,7	102,7
Cavallino	40,5	62,9	55,4	73,7	80,2	70,2	51,4	77,8	117,8	89,1	107,4	77,1
Conegliano	66,3	65,0	67,6	104,2	128,6	124,6	87,3	130,7	137,6	129,2	173,8	120,5
Gesia	33,3	49,5	47,8	66,4	75,4	72,8	44,8	70,7	84,9	87,4	80,1	63,6
Legnaro	36,0	59,3	51,3	73,2	93,0	67,1	73,2	72,6	97,1	83,4	96,7	71,7
Lonigo	34,5	51,0	50,5	76,4	75,9	68,9	63,8	70,9	83,2	81,4	94,7	73,1
Malo	69,3	74,4	77,6	122,8	147,9	108,6	101,4	118,5	120,4	146,1	195,3	138,8
Portogruaro	59,2	75,2	69,1	99,1	90,7	83,2	79,0	109,8	127,5	109,8	131,0	96,7
Pradon	36,2	49,0	52,6	64,1	54,3	56,2	35,0	65,2	95,6	87,6	71,8	60,2
Teolo	39,4	66,7	58,3	96,9	83,8	77,3	56,8	73,9	89,5	97,0	130,4	86,1
Treviso	56,0	68,5	65,0	89,0	128,4	86,9	68,4	100,8	141,6	96,9	140,4	98,9
Vangadizza	29,5	48,1	44,5	78,6	75,4	61,6	44,4	67,8	80,3	74,3	91,7	62,4
Villafranca	38,2	44,1	45,7	78,4	71,0	77,8	70,7	78,1	103,1	88,0	109,6	70,9

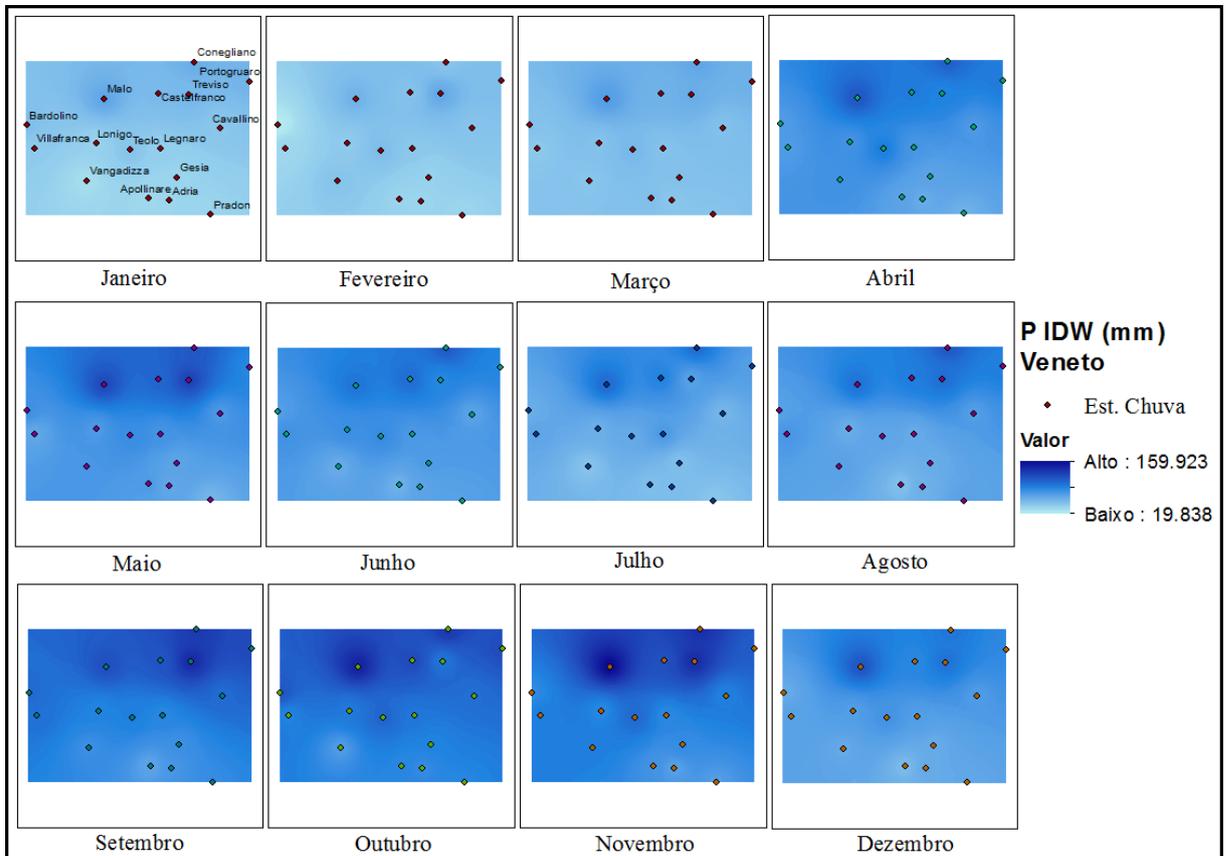
Fonte: Próprio autor.

Tabela 3 - Estações utilizadas no trabalho, e respectivos dados mensais médios de evapotranspiração de referência (ET_o), em mm.

Evapotranspiração de Referência (ET _o) em mm												
Estação/Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Adria	13,3	22,7	51,9	80,9	117,7	129,9	144,2	124,8	81,3	43,8	18,1	11,6
Apollinare	12,4	21,9	50,2	78,5	114,9	132,4	147,4	124,8	79,5	40,8	16,5	10,7
Bardolino	21,2	29,9	57,9	81,2	117,6	133,9	146,3	126,6	81,2	43,3	24,8	22,1
Castelfranco	10,3	21,2	49,0	77,3	114,9	129,2	140,4	120,8	73,3	36,5	14,1	7,2
Cavallino	13,1	21,0	42,9	64,1	95,7	109,2	121,4	104,0	66,4	36,8	16,4	11,4
Conegliano	17,1	26,6	50,8	74,4	108,8	121,0	132,6	115,5	72,1	39,3	19,9	15,0
Gesia	12,1	22,1	48,2	72,8	110,1	124,0	133,2	114,4	73,8	39,2	16,8	10,9
Legnaro	13,5	23,0	49,9	75,6	110,8	127,5	139,0	117,0	75,7	41,2	17,8	12,0
Lonigo	12,3	24,1	54,7	79,6	119,6	134,7	147,5	128,8	79,5	40,6	16,4	10,0
Malo	15,0	25,3	51,3	75,8	110,4	124,9	135,9	119,1	73,0	37,7	17,4	12,0
Portogruaro	12,9	23,2	49,3	74,6	110,8	124,9	136,6	118,3	72,8	38,5	16,3	10,3
Pradon	13,5	22,7	48,8	72,1	107,4	122,4	134,3	114,3	73,2	39,7	17,6	12,2
Teolo	16,8	27,1	52,8	73,5	109,7	124,4	137,4	121,1	74,2	39,1	18,7	15,3
Treviso	9,1	19,1	44,8	73,0	107,3	122,6	133,4	111,2	68,5	33,7	12,9	6,3
Vangadizza	11,6	21,1	51,0	76,8	114,3	131,2	142,4	120,4	76,3	38,9	15,9	9,6
Villafranca	10,2	21,0	50,0	75,7	114,0	127,8	136,0	116,7	70,8	35,3	13,7	7,5

Fonte: Próprio autor.

Figura 3 - Mapas da espacialização das precipitações, interpoladas pelo método Inverso da Potência das Distâncias (IDW).

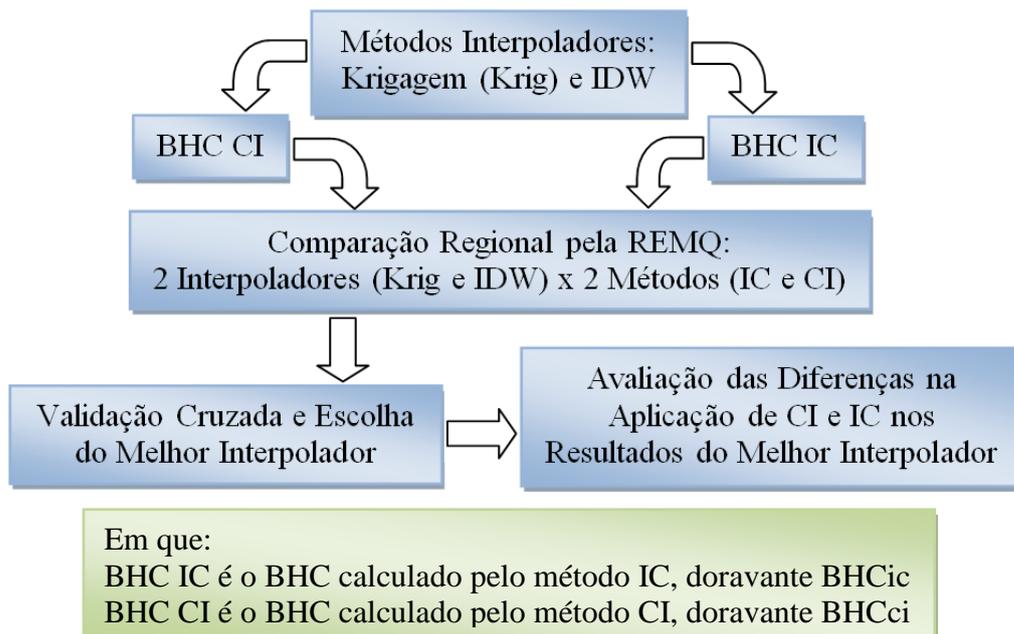


Fonte: Próprio autor.

5.3.2 Métodos

A análise das diferenças entre os métodos Cálculo-Interpolação (CI) e o Interpolação-Cálculo (IC) foi realizada segundo as etapas apresentadas no fluxograma apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma das etapas metodológicas para a comparação entre o método Cálculo-Interpolação (CI) e Interpolação-Cálculo (IC).



Fonte: Próprio autor.

Os dados de precipitação (P) e de evapotranspiração (ETo) foram espacializados por Krigagem (ordinário, semivariograma esférico) e Inverso do Quadrado da Distância ou Inverso da Potência das Distâncias, do inglês *Inverse Distance Weighting* (IDW), com o uso do Programa ArcGIS® (ESRI, 2014a), *datum* WGS84 e resolução espacial de 500 x 500 metros. Esses dois métodos interpoladores foram pré-selecionados por serem comumente utilizados em estudos ambientais.

Criou-se uma ferramenta, em linguagem de programação Python™ (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2014) utilizando o *package* ArcPy®, que possibilitou a geração do algoritmo de integração das variáveis inerentes ao BHC, seguindo o que foi proposto por Thornthwaite e Mather (1955).

O BHC calculado nesse trabalho teve como dados de entrada:

- a) Precipitação: média das precipitações para cada mês do ano;
- b) ETo: valores médios de ETo para cada mês do ano;
- c) Capacidade de Água Disponível (CAD): considerado um valor de 100 mm para toda a área.

Para se realizar a comparação entre os dois processos de espacialização do BHC analisados nesse trabalho, CI e IC, seguiu-se a seguinte metodologia:

5.3.2.1 Princípio cálculo-interpolação (CI)

O cálculo do BHC foi realizado para cada estação e para cada mês do ano. Após o cálculo, realizou-se a interpolação dos resultados dessas estações por dois métodos: Krigagem e IDW. Geraram-se rasters denominados BHCci (BHCciIDW, por IDW e BHCciKRIG, por Krigagem), pois o resultado final é produto da interpolação dos balanços.

5.3.2.2 Princípio interpolação-cálculo (IC)

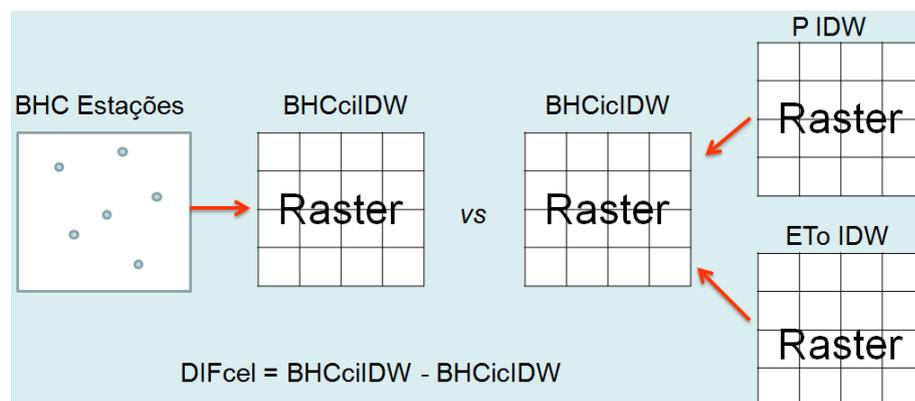
Considerando que os rasters de entrada no modelo, precipitação e ETo são gerados a partir da interpolação de tais variáveis, conforme suas respectivas estações, dois BHC foram realizados, um que considerou rasters de entrada precipitação e ETo gerados a partir do método de interpolação krigagem, e outro a partir do método de interpolação IDW. Geraram-se rasters denominados BHCic (BHCicIDW, por IDW e BHCicKRIG, por Krigagem), pois o resultado final é produto do cálculo na célula após a interpolação.

5.3.2.3 Estratégia de comparação dos métodos de espacialização do BHC

A comparação entre IC e CI se deu de quatro maneiras (4 análises), segundo os interpoladores envolvidos:

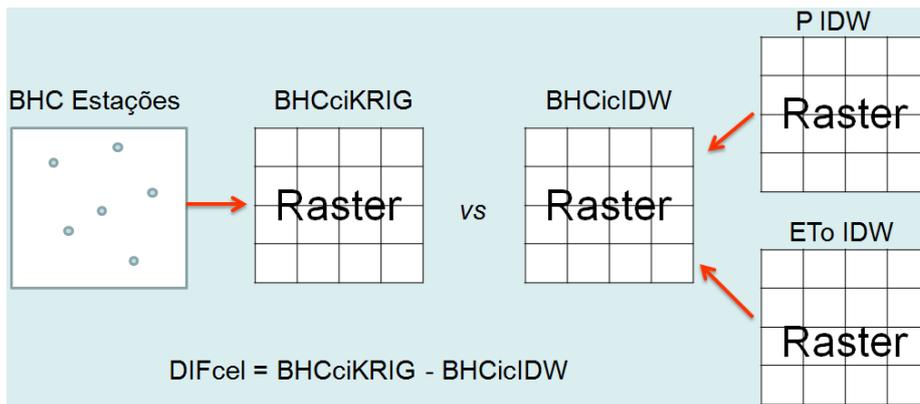
- BHCicIDW calculado pela interpolação IDW das variáveis de entrada do modelo vs BHCciIDW de cada estação interpolado por IDW (Figura 5);

Figura 5 - Esquema da comparação entre a espacialização do BHCicIDW pelo método IC e a espacialização do BHCciIDW pelo método CI.



- b) BHCiIDW calculado pela interpolação IDW das variáveis de entrada do modelo vs BHCiKRIG de cada estação interpolado por krigagem (Figura 6);

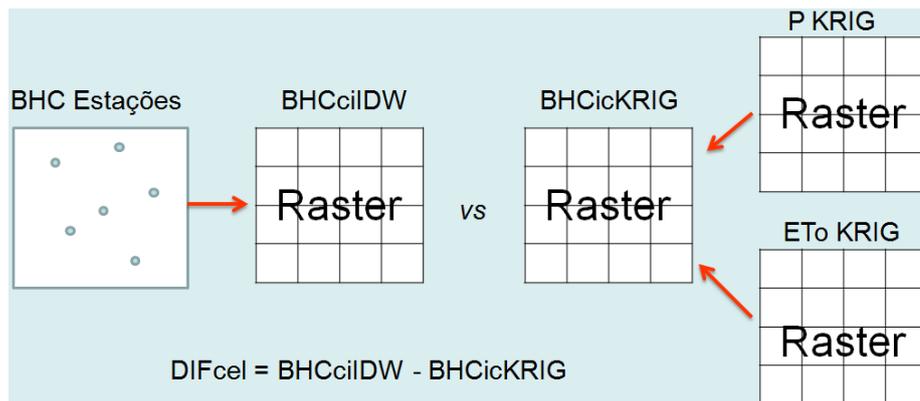
Figura 6 - Esquema da comparação entre a espacialização do BHCiIDW pelo método IC e a espacialização do BHCiKRIG pelo método CI.



Fonte: Próprio autor.

- c) BHCiKRIG calculado pela interpolação krigagem das variáveis de entrada do modelo vs BHCiIDW de cada estação interpolado por IDW (Figura 7);

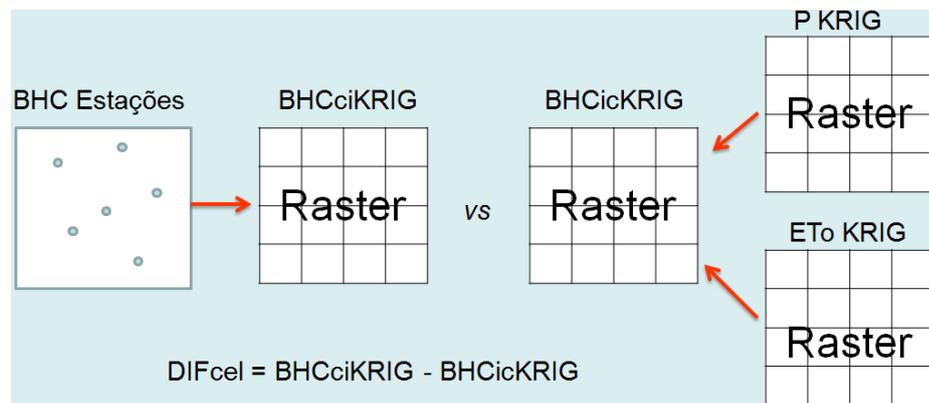
Figura 7 - Esquema da comparação entre a espacialização do BHCiKRIG pelo método IC e a espacialização do BHCiIDW pelo método CI.



Fonte: Próprio autor.

- d) BHCicKRIG calculado pela interpolação krigagem das variáveis de entrada do modelo vs BHCciKRIG de cada estação interpolado por krigagem (Figura 8).

Figura 8 - Esquema da comparação entre a espacialização do BHCicKRIG pelo método IC e a espacialização do BHCciKRIG pelo método CI.



Fonte: Próprio autor.

Cada análise se deu pela comparação entre um raster de BHC feito célula a célula e outro raster de BHC obtido pela interpolação dos balanços calculados para cada estação. Isso se repetiu para todos os meses do ano, ou seja, cada mapa de balanço de um referente mês foi comparado ao seu equivalente por subtração, conforme a Equação 1:

$$\text{DIFcel} = \text{BHCci} - \text{BHCic} \quad (1)$$

Em que:

DIFcel: é a diferença entre o resultado das duas metodologias;

BHCci: é o raster do balanço de um mês, obtido a partir da interpolação dos valores de balanço de cada estação (CI);

BHCic: é o raster do balanço de um mês, obtido a partir do emprego da metodologia de Thornthwaite e Mather (1955) em cada célula do raster (IC);

Sendo assim, cada raster resultante dessa diferença foi trabalhado para se calcular a estatística Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQU), considerando todos os pixels. Esses dados foram então colocados em forma de gráfico para serem analisados. É importante deixar claro que, embora o indicador estatístico utilizado neste trabalho seja a REMQU, neste caso este "erro", quando utilizado para identificar as diferenças entre os métodos, deve ser

compreendido exatamente como diferença e não erro propriamente dito, haja visto que foram considerados todos os pixels na geração desta REMQ.

Definiu-se, para fins de análise, o BHC_{ic} como o referencial na Equação 1, ou seja, nesse estudo, a diferença entre as duas estimativas de BHC, chamada DIF_{cel}, é considerada super ou subestimada, observando os valores obtidos pelo BHC_{ci} em relação ao BHC_{ic}.

Para verificar diferenças entre as 4 análises, realizou-se um teste estatístico de igualdade de médias. Investigou-se se, ao nível de significância de 5%, existe diferença entre os erros REMQ gerados para meses de excesso hídrico no BHC. Pelo teste t de Student, testaram-se as hipóteses H₀: $\mu_1 = \mu_2$ e H_a: $\mu_1 \neq \mu_2$, em que μ são as médias dos REMQ de cada uma das 4 análises, sendo μ_1 sempre a média do método de menor erro REMQ e μ_2 a média das outras 3 análises.

Por fim, examinaram-se os mapas de BHC (gerados pelo melhor interpolador) para o mês de outubro por ambos os métodos IC e CI para auxiliar na compreensão do comportamento regional da aplicação de ambos os métodos. Escolheu-se outubro por ter apresentado os maiores erros REMQ nas 4 comparações, proporcionando, assim, o maior contraste para a análise. Para tal, traçou-se uma linha reta, simulando um "corte" no mapa, identificando os valores dos pixels sob a reta. Procurou-se traçar o "corte" de forma a obter-se um maior contraste, ao longo do mapa, dos valores de pixels. Pontos foram criados (43 no total) sobre essa linha ("corte") para facilitar a extração dos valores de pixel que, por sua vez, foram colocados em gráfico para comparação visual entre os métodos CI e IC.

5.3.2.4 Validação Cruzada e análise dos erros pontuais dos métodos de espacialização do BHC

Uma análise dos erros gerados nos pontos (estações) foi realizada para verificar a diferença entre os métodos CI e IC de espacialização do BHC, uma vez que esses são dados de referência, não influenciados por interpoladores.

Para analisar os erros gerados pelo método CI, realizou-se a validação cruzada dos valores de BHC, calculados nas estações. Primeiro realizou-se a validação cruzada dos valores de precipitação (P) e de evapotranspiração (ETP), para identificar, entre a krigagem utilizada neste trabalho, e o IDW, qual destes métodos interpoladores melhor representaria estas variáveis.

Calculou-se o BHC nas estações e, utilizando-se do melhor interpolador, apontado na validação cruzada de P e ETP, realizou-se uma nova validação cruzada, mas agora com os valores de BHC, gerando valores de erros pontuais (nas estações).

Para analisar os erros gerados pelo método IC, utilizou-se das estimativas de P e ETP resultantes da validação cruzada destas variáveis, pelo melhor método interpolador, os quais são valores estimados por interpolação, considerando a ausência da estação como ilustrado na Figura 1, calculando-se um BHC estimado com esses valores de P e ETP estimados, que por sua vez foram comparados aos valores de BHC das estações, seguindo assim uma lógica similar à validação cruzada.

Sendo assim, o cálculo do erro para o método IC foi realizado conforme a Equação 2. Tal análise foi feita para cada mês do ano.

$$\text{Erro}_{\text{IC}}\text{BHC}_n = \text{BHC}_n\text{Estimado} - \text{BHC}_n\text{Real} \quad (2)$$

onde:

n refere-se às estações utilizadas (0 a 15);

$\text{Erro}_{\text{IC}}\text{BHC}_n$ é erro para o método IC, em mm;

$\text{BHC}_n\text{Estimado}$ é o balanço calculado na estação n com os valores estimados pela validação cruzada de P e ETP por IDW;

BHC_nReal é o balanço calculado na estação n com os valores medidos de P e ETP na estação.

Para verificar as diferenças dos dois métodos (IC e CI) na geração de erros, realizou-se um teste estatístico (teste t de Student), investigou-se se, ao nível de significância de 5%, existe diferença entre os erros (mm) gerados nas estações, pelos métodos avaliados.

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi realizado o cálculo do balanço hídrico para cada uma das estações com dados observados. Apresenta-se na Tabela 4, os resultados do BHC em cada estação climatológica.

Tabela 4 - Valores de Balanço Hídrico (BHC) em cada estação climatológica, para cada mês.

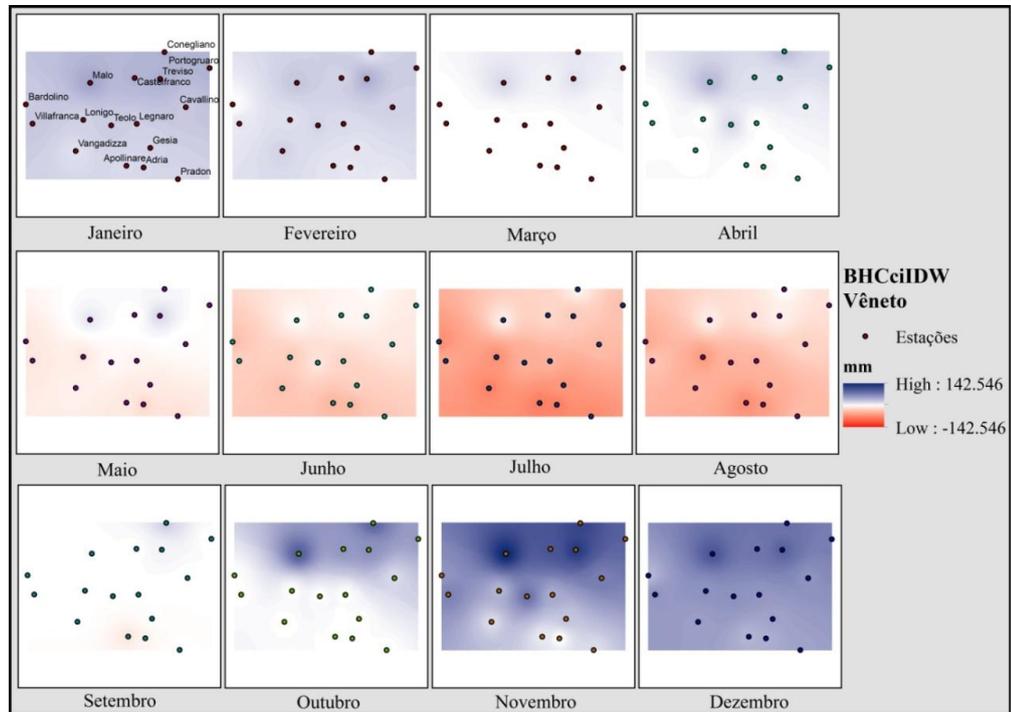
Estação/Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Adria	20,4	11,4	-0,4	-3,8	-23,7	-43,8	-80,5	-62,5	-6,3	0	0	43,1
Apollinare	19,2	13,4	0,0	-0,9	-12,5	-45,7	-82,0	-72,4	-14,3	0	10,5	39,1
Bardolino	27,4	-0,5	-1,7	-2,2	-14,8	-40,1	-71,5	-53,1	0	0,5	58,7	38,2
Castelfranco	41,3	24,3	7,5	16,6	-0,4	-5,3	-23,1	-17,4	0	59,1	104,2	79,3
Cavallino	29,1	23,6	3,8	8,7	-2,4	-14,6	-42,2	-26,2	0	19,7	73,8	60,4
Conegliano	42,9	17,1	13,4	34,7	5,2	-0,4	-6,6	-0,7	25,3	93,1	117,9	82,1
Gesia	22,8	14,3	0,0	-0,3	-11,5	-27,7	-65,2	-47,6	0	0	31,2	50,2
Legnaro	25,2	19,0	-0,1	0,0	-6,7	-25,7	-46,3	-46,8	0	0	44,8	58,8
Lonigo	24,0	16,2	-0,4	-0,3	-13,6	-31,1	-69,8	-62,7	0	0	39,0	60,6
Malo	49,5	30,5	19,8	38,1	11,5	-3,4	-11,7	-10,4	0	98,5	142,5	102,9
Portogruaro	42,8	26,5	8,3	20,8	-2,5	-12,1	-39,5	-18,7	0	55,1	93,9	74,6
Pradon	21,4	11,4	-0,1	-1,7	-19,5	-33,5	-74,4	-42,7	0	0	17,4	51,0
Teolo	27,3	21,9	0	19,6	-3,6	-16,2	-49,5	-46,9	0	0	83,1	61,9
Treviso	43,6	44,2	15,5	16,6	19,1	-5,6	-31,4	-6,8	6,2	63,1	127,4	93,3
Vangadizza	15,7	23,7	-0,3	0	-8,7	-38,7	-78,0	-47,5	0	0	18,6	52,6
Villafranca	30,2	12,5	-0,4	-0,4	-15,9	-29,1	-54,8	-36,1	0	0	71,3	60,0

Fonte: Próprio autor.

5.4.1 Diferença entre os métodos de espacialização do BHC

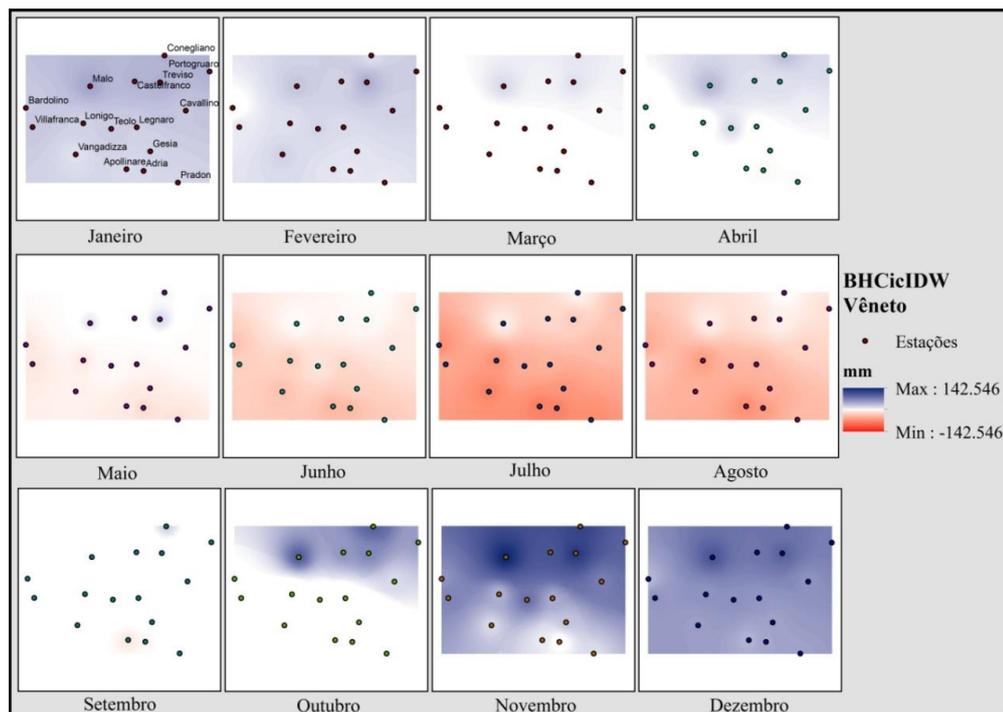
Considerando que os testes de validação cruzada identificaram IDW como o melhor interpolador, para ilustrar se apresenta na Figura 9 e na Figura 10, somente a espacialização dos resultados obtidos por esse interpolador. A Figura 9 apresenta os resultados obtidos na espacialização do BHC pelo método CI; a Figura 10 apresenta os resultados obtidos na espacialização do BHC pelo método do IC; e a Figura 11 mostra as diferenças (DIFcel) entre o BHCci realizado por meio de interpolação IDW dos BHC das estações (BHCciIDW) e o BHCic que utilizou a interpolação IDW para estimar os dados de entrada (BHCicIDW) e calculou o BHC célula a célula.

Figura 9 - Balanço Hídrico Climatológico (BHC) espacializado pelo método Cálculo-Interpolação (CI), pelo interpolador IDW, identificado por BHCciIDW.



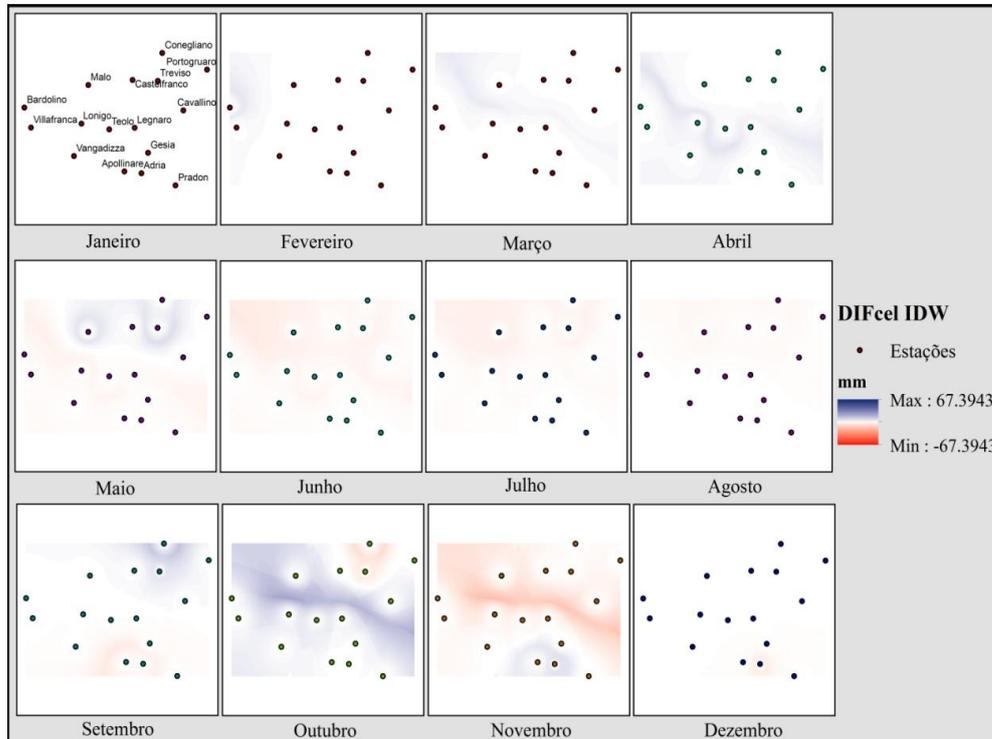
Fonte: Próprio autor.

Figura 10 - Balanço Hídrico Climatológico (BHC) espacializado pelo método Interpolação-Cálculo (IC), pelo interpolador IDW, identificado por BHCicIDW.



Fonte: Próprio autor.

Figura 11 - Diferença entre Balanço Hídrico Climatológico (BHC) espacializado pelo método Cálculo-Interpolação (CI), pelo interpolador IDW e o BHC espacializado pelo método Interpolação-Cálculo (IC), também por IDW, identificado como DIFcelIDW.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 9, a Figura 10 e a Figura 11 apresentam escala de cor variando do vermelho, para valores negativos, ao azul, para valores positivos, possuindo valor central de zero correspondente ao branco, possibilitando a comparação visual entre os métodos CI e IC para os mapas de BHC.

Ao norte da Figura 9 e da Figura 10, nota-se os azuis mais intensos nas partes com excesso hídrico no BHC e os vermelhos menos intensos nas partes de déficit hídrico no BHC, indicativos de maior presença de água no solo, demonstrando uma tendência das áreas mais ao norte serem mais úmidas dos que as áreas do sul, independente do método adotado para espacialização. Já ao sul estão os vermelhos mais intensos, demonstrando tendência ao déficit hídrico no BHC ao sul da área de estudo.

Observando-se a Figura 11, percebe-se, de forma qualitativa, claramente as áreas que apresentaram DIFcel de super ou subestimação do BHCciIDW, pois a escala de cor utilizada nessa figura possui como ponto central o branco, ou seja, quanto mais próximo ao branco uma área for, menor é a diferença entre os métodos, enquanto que mais próximo ao azul, tal área

apresenta superestimação do BHCciIDW com relação ao BHCicIDW, e, quanto mais próximo ao vermelho, o modelo que calculou BHCciIDW subestimou tais valores.

Nota-se uma tendência de menores diferenças ao redor das estações, o que é de se esperar, pois quanto mais próximo das estações, menores as diferenças entre os valores das variáveis interpoladas a partir dos pontos das estações. À medida que se distancia, em função da não linearidade do modelo, elevam-se as diferenças dos dois modelos, já que no BHCci o interpolador pode não ser tão eficiente para representar a não linearidade entre as variáveis do balanço.

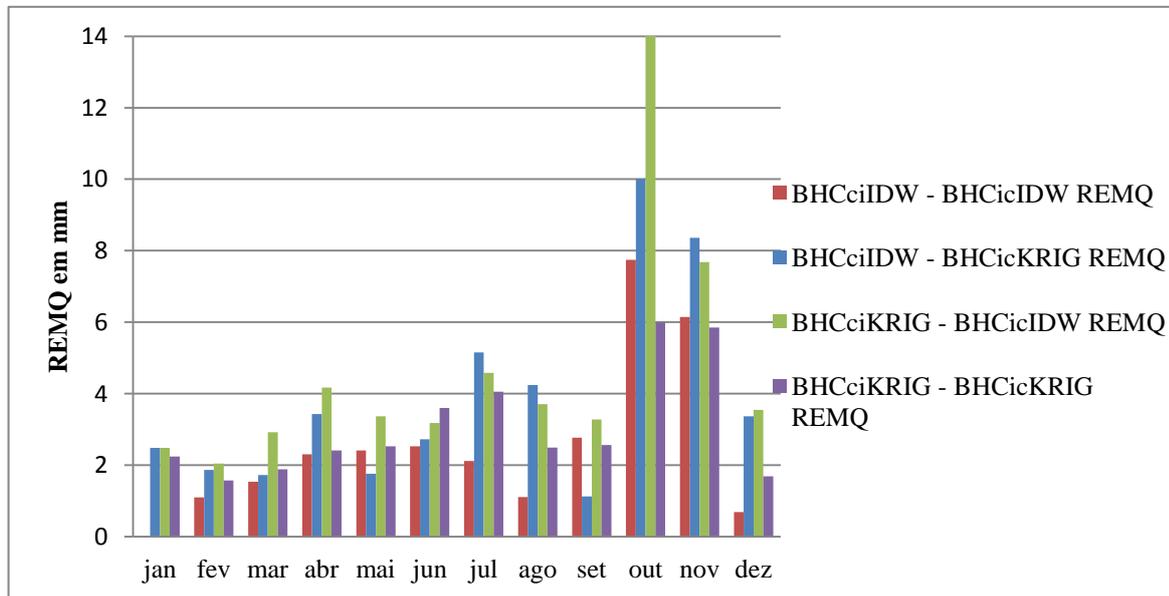
Na Tabela 5 podem-se verificar os DIFcel positivos e os negativos, em cada mês, e respectiva percentagem de área com DIFcel positivos e negativos, referentes à Figura 11. Uma estatística que melhor evidencia os erros em módulo é a Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ), neste caso, como não se trata de erro mas de diferença entre métodos, este "erro" deve ser entendido como diferença, ou seja, "Raiz da Diferença Média Quadrática", conforme ilustrado na Figura 12, com os valores de REMQ de cada um dos BHC.

Tabela 5 - Médias de DIFcel, percentual dessas médias em relação às precipitações mensais e percentual de área com DIFcel positivo ou negativo, referentes à Figura 1 (IDW).

Mês	Precipitação Média (PM) mm	Média DIFcel Positivo (MEP) mm	MEP/PM em %	Média DIFcel Negativo (MEN) mm	MEN/PM em %	Área DIFcel positivos %	Área DIFcel negativos %
Jan	42,52	0,0007	0,0017	-0,0004	-0,0010	70	30
Fev	42,07	0,5501	1,3076	-0,0005	-0,0013	86	14
Mar	50,23	1,0739	2,1380	-0,0789	-0,1571	98	2
Abr	79,97	1,7291	2,1621	-0,0285	-0,0356	99	1
Mai	83,08	2,6888	3,2364	-1,5475	-1,8627	33	67
Jun	78,55	0,0462	0,0588	-2,1122	-2,6890	1	99
Jul	64,45	0,0648	0,1005	-1,7326	-2,6883	4	96
Ago	72,38	0,0185	0,0255	-0,8755	-1,2095	3	97
Set	96,87	2,6724	2,7587	-1,1146	-1,1506	40	60
Out	100,52	6,1761	6,1441	-3,6848	-3,6657	91	9
Nov	98,47	2,9403	2,9860	-4,9505	-5,0274	14	86
Dez	73,99	0,0012	0,0017	-0,3917	-0,5294	21	79

Fonte: Próprio autor.

Figura 12 - Gráfico da Estatística Raiz do "Erro" (DifCel) Médio Quadrático (REMQ em mm) das comparações entre BHCic e BHCci.



Fonte: Próprio autor.

Verifica-se na Figura 12 que os meses dezembro, janeiro e fevereiro (de excesso hídrico no BHC) apresentaram os menores valores na comparação BHCciIDW - BHCciIDW, o que demonstra baixo impacto na utilização de um ou outro método (CI ou IC) para a situação de excesso hídrico no BHC. O mês de novembro também apresenta excesso hídrico no BHC na maior parte das regiões, porém, como demonstrado na Figura 9, na Figura 10 e na Figura 11, uma estação (Adria) apresenta comportamento bem diferenciado das outras, o que reflete um comportamento também diferenciado quando aplicados os métodos CI ou IC, facilmente identificável na Figura 11.

Procurando verificar se esse comportamento de baixo valor de diferença observado nos meses de excesso hídrico no BHC ocorre apenas para BHCciIDW - BHCciIDW, um teste estatístico de igualdade de médias foi aplicado para os meses novembro, dezembro, janeiro e fevereiro. Investigou-se se, ao nível de significância de 5%, existe diferenciação entre as diferenças REMQ geradas nesses meses. A Tabela 6 apresenta os resultados do teste t.

Tabela 6 - Teste t realizado entre as 4 análises para os meses de excesso hídrico no Balanço Hídrico Climatológico (BHC).

	BHCciIDW - BHCicIDW	BHCciIDW - BHCicKRIG	BHCciKRIG - BHCicIDW	BHCciKRIG - BHCicKRIG
	REMQ	REMQ	REMQ	REMQ
jan	0,0008	2,4825	2,4822	2,2460
fev	1,1038	1,8662	2,0448	1,5763
nov	6,1458	8,3593	7,6856	5,8556
dez	0,6939	3,3719	3,5484	1,6922
Média	1,9861	4,0200	3,9402	2,8425
p (student)		0,0184	0,0208	0,2065
% médias*		102%	98%	43%

Fonte: Próprio autor.

* Percentual da diferença das médias (coluna em questão em referência à média de BHCciIDW - BHCicIDW).

Verificando que os resultados da Tabela 6 demonstram um p inferior a 0,05 de nível de significância considerado, pode-se afirmar que, para os meses de excesso hídrico no BHC, 2 análises se diferem da análise BHCciIDW - BHCicIDW, rejeitando-se H0. BHCciKRIG - BHCicKRIG apresentou um p de 0,2065, portanto, considerando o elevado percentual de diferença entre as médias, para esse caso, não se pode afirmar que as médias sejam diferentes. Este percentual de 43% de diferença entre médias se deu devido à alta variabilidade entre os valores contidos na primeira e na última análise, os quais possuem um coeficiente de variação C.V. = 95,89 %.

Considerando-se que as diferenças REMQ referentes aos meses dezembro, janeiro e fevereiro foram as menores na análise BHCciIDW - BHCicIDW, que, por sua vez, mostrou-se estatisticamente semelhante ao BHCciKRIG - BHCicKRIG, os resultados demonstram que para este local, se não houvesse períodos de déficit hídrico no BHC, utilizar-se do método CI poderia ser confiável, para ambos interpoladores IDW e Krigagem.

Vale ressaltar que a REMQ gerada pela comparação BHCciIDW - BHCicIDW, conforme a Figura 12, apresentou o menor valor em 8 dos 12 meses, reforçando a superioridade do interpolador IDW, para este estudo, apontada previamente pela validação cruzada de P e ETo, o que reforça a importância de avaliar a performance dos interpoladores para identificar o método interpolador mais adequado na geração do BHC espacializado para cada caso.

Analisando o gráficos da Figura 2, nota-se que os meses de déficit hídrico no BHC (maio, junho e julho) e, em especial, alguns meses de recarga da CAD (outubro e novembro), apresentaram as maiores diferenças.

É esperado que o método da interpolação de BHC das estações (BHCci) gere erros de maior grandeza em situações de déficit hídrico no BHC quando comparado a BHCic. Esse é um comportamento dito esperado, pois o BHC é calculado conforme ARM, que, por sua vez, é estimado por uma equação exponencial, em situações de déficit hídrico no BHC, que visa simular a retirada de água do solo, como o que ocorre naturalmente. Nos meses de recarga, os erros ocorrem, pois devido à variabilidade da precipitação, diferente da variabilidade da ETo, podem ocorrer locais com presença de déficit hídrico no BHC, enquanto outros já estão em recuperação do armazenamento. Isso explica erros também mais elevados nesses meses.

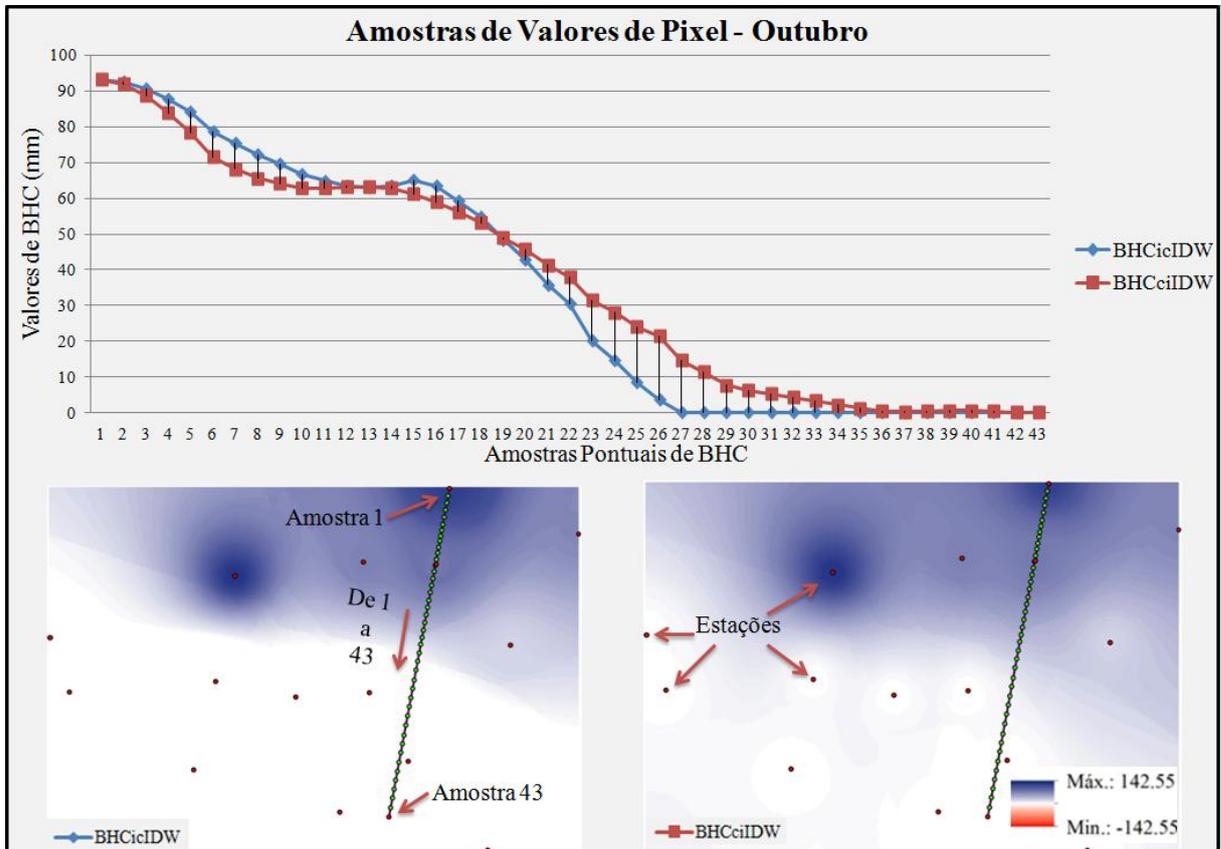
Já na metodologia que interpola os valores de BHC das estações (CI), tal simulação não é realizada espacialmente, e sim apenas na estação em questão, tendo como resultado de BHC somente valores interpolados das estações, suavizando os resultados. Esse comportamento é facilmente verificado na Figura 43.

A Figura 43 apresenta uma comparação gráfica entre os métodos CI e IC, espacializados por IDW no mês de outubro. Para explicar melhor, foi traçado um "corte" na região e retirados os valores do BHC ao longo da reta, para os dois métodos. É visível a diferença de valores calculados entre os métodos quando comparadas as duas curvas. Percebe-se que o método IC apresenta curvas mais acentuadas na linha que desenha o comportamento do BHC, evidenciando o comportamento não linear do BHC.

Por outro lado, o método CI apresenta uma linha com menores variações acentuadas no eixo y, função de interpolar os resultados nos pontos e, por consequência, não capta as variações espaciais, como pode ser facilmente identificável nos pontos de amostras de BHC que vão do 20 ao 35 (eixo x de ambos os gráficos). Enquanto que nesse trecho o método IC prevê uma situação de BHC muito próxima ao déficit hídrico ($BHC = 0$), o método CI representa uma situação de excesso hídrico no BHC que pode não condizer ao esperado, em especial a partir do ponto 27, possivelmente promovendo informação errônea para tais localidades. Se houvesse pelo menos uma estação nas proximidades do ponto 27, seria possível que as diferenças entre os dois métodos não fossem significativas nesse trecho.

Assim, dessa análise pode-se concluir que o método IC é uma opção metodológica de resultados mais promissores, assim como a existência de maior densidade de informação pode minimizar os erros entre os métodos.

Figura 43 - Diferenciação da distribuição dos valores de pixel de balanço (BHC) em ambos métodos CI e IC, para o mês de outubro.



Fonte: Próprio autor.

Encontra-se, também na Figura 43, a explicação para a grande diferença entre os dois métodos, verificada na Figura 1 e na Tabela 5. Nos meses de março, abril e outubro, 98, 99 e 91% de suas respectivas áreas apresentaram uma superestimação dos valores de BHC pelo método CI em relação ao IC. Isso é devido ao método IC estimar valores de $BHC = 0$, em que a planta retira do reservatório do solo a demanda de evapotranspiração, enquanto que CI não os reconhece, exatamente como observado nos pontos de amostras de BHC 27 a 35 da Figura 43, conforme explicado anteriormente.

Já nos meses de junho, julho e agosto, que foram meses de déficit hídrico no BHC, o método CI subestimou os valores de BHC em relação ao IC por apresentarem 99, 96 e 97% de suas áreas com DIFcel negativo. Isso se dá pelo fato de que, embora a ETo apresente pouca variabilidade espacial, a precipitação apresenta grande variabilidade. Quando se calcula o BHC para uma estação e depois o interpola (CI), a suavização dos resultados já não demonstra as variabilidades da mesma forma que o método IC. Já o método que interpola primeiro (IC) permite que o modelo perceba tal variabilidade espacial, tornando a

diferenciação entre os dois métodos ainda maior por considerar, nos meses de déficit hídrico no BHC, fórmula exponencial, já discutida, acumulando, assim, não linearidades sobrepostas.

Já o mês de setembro apresenta 40% de sua área com DIFcel positivo e 60% negativo. Esse é um mês que, como se pode verificar na Figura 3, na Figura 9 e na Figura 0, apresenta tendências de BHC distintas entre norte e sul na área de estudo. Ao norte, por estar mais próximo aos Alpes, a área tende a ser mais chuvosa e, conseqüentemente, a apresentar BHC positivo em relação ao sul. Devido a isso, nota-se claramente na Figura 1 que os métodos IC e CI se comportam distintamente em cada situação, ou seja, CI apresenta uma tendência a superestimar em meses de excesso hídrico no BHC e subestimar em meses de déficit hídrico no BHC, quando comparado a IC.

5.4.2 Validação Cruzada e Análise dos erros dos métodos de espacialização do BHC

Verifica-se na Tabela 7, os resultados da validação cruzada de P e ETP. Os valores dos erros (em mm) de cada uma das 16 estações foram transformados na Raiz do Erro médio Quadrático (REMQ) de cada mês, apontando qual dos dois métodos interpoladores avaliados, IDW e krigagem, gerou os menores erros (mm), em módulo, por mês.

Tabela 7 - Valores da Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) resultantes da validação cruzada da precipitação e da evapotranspiração.

	Janeiro				Fevereiro				Março			
	IDW		Krigagem		IDW		Krigagem		IDW		Krigagem	
ETP (REMQ) mm	3,98	1*	5,60	0*	3,45	1	4,13	0	3,38	1	4,47	0
P (REMQ) mm	7,82	1	8,65	0	8,28	1	18,36	0	6,82	1	10,64	0
Nota*		2		0		2		0		2		0
	Abril				Maio				Junho			
ETP (REMQ) mm	4,07	1	5,92	0	5,27	1	7,86	0	5,68	1	9,34	0
P (REMQ) mm	11,65	1	15,32	0	15,41	1	24,15	0	11,24	0	9,19	1
Nota*		2		0		2		0		1		1
	Julho				Agosto				Setembro			
ETP (REMQ) mm	6,57	1	10,52	0	6,05	1	8,73	0	4,31	1	7,39	0
P (REMQ) mm	15,08	1	16,05	0	11,34	1	17,81	0	10,92	1	21,05	0
Nota*		2		0		2		0		2		0
	Outubro				Novembro				Dezembro			
ETP (REMQ) mm	3,04	1	6,17	0	3,72	1	5,32	0	4,99	1	6,73	0
P (REMQ) mm	17,92	0	11,09	1	19,29	1	39,57	0	12,28	1	23,29	0
Nota*		1		1		2		0		2		0

Fonte: Próprio autor.

* O menor valor da Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) recebeu a nota 1, enquanto que o maior valor recebeu nota 0.

Dos 12 meses do ano, IDW apresentou os menores erros (REMQ) em 10 meses. Nos outros dois meses, IDW apresentou os menores valores de REMQ na validação cruzada da ETP, enquanto que a krigagem apresentou os menores erros para P. Sendo assim, IDW apresentou os menores erros em 22 das 24 avaliações (92%), demonstrando superioridade para a espacialização desses dados de P e ETP, nesta área de estudo.

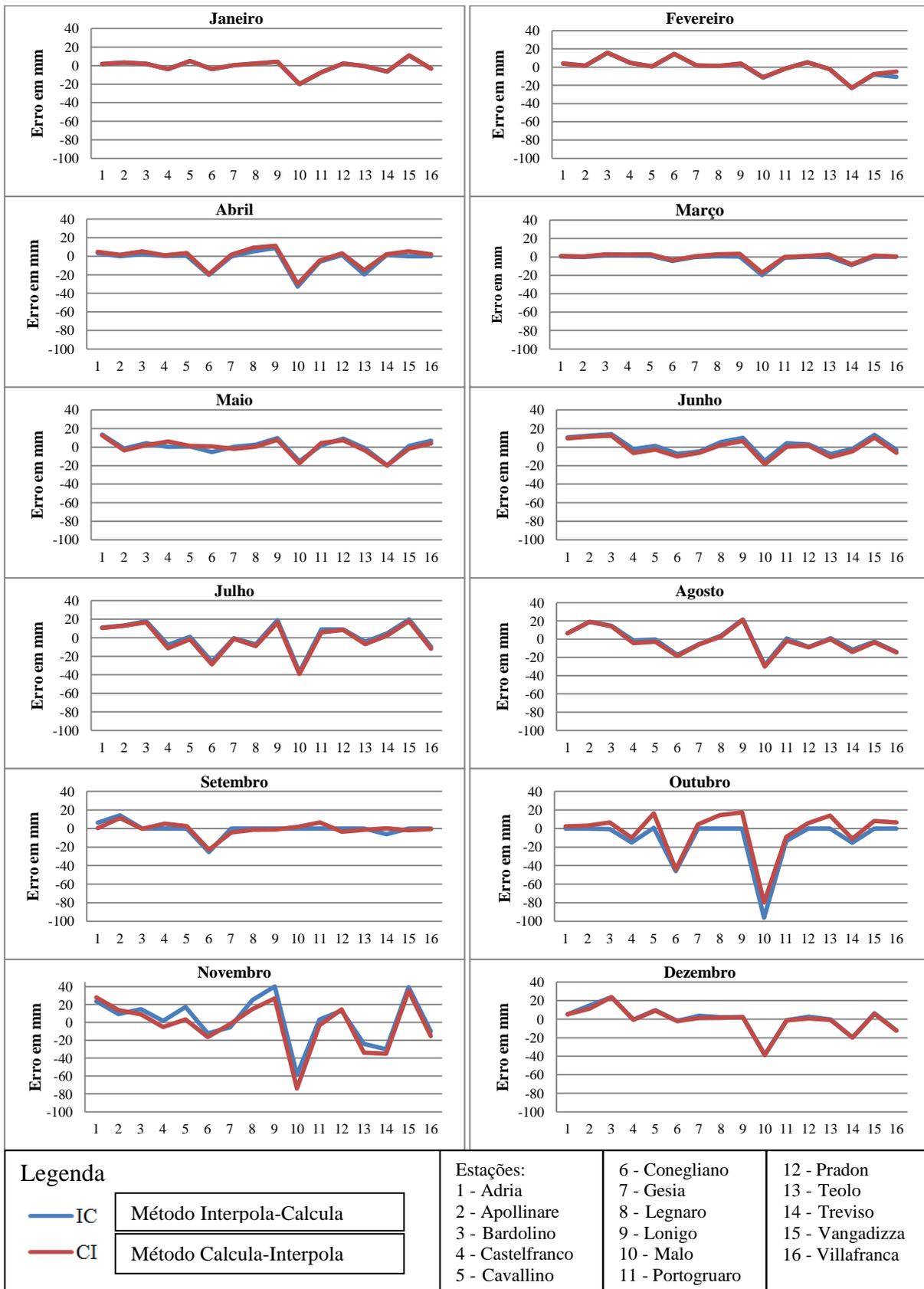
Considerando IDW como o melhor método interpolador para esse estudo, uma análise dos erros gerados nos pontos (estações) foi realizada para verificar a diferença entre os métodos CI e IC de espacialização do BHC. O resultado desta análise encontra-se na Figura 54 e na Tabela 8.

Conforme os erros pontuais (Figura 54), dos doze meses do ano, o método IC apresentou os menores erros em 7, enquanto que em 4 meses CI e IC empataram e CI foi melhor em apenas 1 mês (dezembro), apontando que o método IC gera os menores erros nas estações quando analisa-se cada mês. Já em uma visão geral, considerando as 192 comparações, em 59% destas teve-se IC com os menores erros pontuais, enquanto que CI teve 41% dos menores erros, o que aponta o método IC ser levemente superior ao método CI.

Essa superioridade não se mostrou relevante (significativa) ao nível de 5% conforme o teste "t de student", presente na Tabela 8, apontando não existir grandes diferenças estatísticas entre os métodos, mas sim um elevado grau de equivalência, sugerido pelos altos valores de p%, que não baixaram de 99,7%.

Vale ressaltar uma diferença relevante entre os métodos IC e CI. Embora as análises terem demonstrado que a redução de incertezas promovida pelo emprego método IC na espacialização do BHC ao invés do método CI, sejam mínimas, tal método comporta a espacialização do BHC conforme diferentes valores de CAD, o que não é viável com o método CI de forma distribuída. Este fato traz um leque de opções ao usuário, pois possibilita a geração de cenários de culturas, muito mais rico e dinâmico que pelo método CI, adequando-se a realidade de cada pixel.

Figura 54 - Erros da validação cruzada dos valores de Balanço Hídrico Climatológico (BHC) gerados nos pontos (estações) conforme métodos de espacialização do BHC avaliados.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 8 - Valores de p resultantes do teste t realizado entre os erros pontuais do método Interpola-Calcula (IC) e do método Calcula-Interpola (CI).

	p de student	p%
Adria	0,9991	99,91%
Apollinare	0,9977	99,77%
Bardolino	0,9994	99,94%
Castelfranco	0,9999	99,99%
Cavallino	0,9999	99,99%
Conegliano	0,9987	99,87%
Gesia	0,9970	99,70%
Legnaro	1,0000	100,00%
Lonigo	0,9996	99,96%
Malo	0,9999	99,99%
Portogruaro	0,9996	99,96%
Pradon	0,9983	99,83%
Teolo	0,9997	99,97%
Treviso	0,9995	99,95%
Vangadizza	0,9991	99,91%
Villafranca	0,9994	99,94%

Fonte: Próprio autor.

5.5 CONCLUSÕES

Confrontando os dois métodos de espacialização do BHC de forma distribuída, sendo a primeira (CI) uma interpolação dos balanços de cada estação (BHCci), e a segunda (IC), o cálculo, por programação, do balanço em cada pixel de um raster (BHCic), conclui-se que, embora o método IC consiga menores incertezas na espacialização do BHC em comparação ao método CI, tais incertezas demonstraram-se não serem significativas estatisticamente (ao nível de 5%). Ressalta-se que a utilização do método IC viabiliza a espacialização do BHC conforme diferentes valores de CAD, o que não é possível no método CI, para um mesmo mapa, de forma distribuída. Assim, considerando que as incertezas entre um método e outro não diferem estatisticamente, neste estudo de caso, o método IC representa uma melhora para aplicação do modelo de BHC, pois tem a vantagem de possibilitar a geração de cenários de uso do solo (diferentes valores de CAD) de forma dinâmica, de forma distribuída, em cada pixel.

Como tal estudo visa, entre outros, investigar a utilização do BHC para escalas menores (áreas maiores), a utilização do BHCic se mostrou mais adequado para isso, uma vez que cada cálculo previsto por Thornthwaite e Mather (1955) é aplicado célula à célula,

enquanto que o BHC_{ci} não prevê tal cálculo nas áreas entre estações em comparação ao BHC_c, em especial quando existe déficit hídrico no BHC e/ou recarga do solo, trazendo incertezas à espacialização do BHC nestas situações por suavizar tais valores de balanço entre estações.

Ficou também evidente a importância da escolha do método interpolador, visando à maior qualidade da representação espacial do BHC. Portanto, conclui-se que, ao espacializar o BHC, uma avaliação de diferentes interpoladores, por validação cruzada ou outros métodos, se faz necessária para diminuir incertezas.

REFERÊNCIAS

AGENZIA REGIONALE PER LA PREVENZIONE E PROTEZIONE AMBIENTALE DEL VENETO - ARPAV. **Dati Ambientali**. 2014. Disponível em: <<http://www.arpa.veneto.it/arpav>>. Acesso em: setembro/2014

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. **Food And Agriculture Organization Of The United States - FAO**. Rome, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e06.htm>>. Acesso em: 2014.

ALVES, E. D. L.; VECCHIA, F. A. S. Análise de diferentes métodos de interpolação para a precipitação pluvial no Estado de Goiás-doi: 10.4025/actascihumansoc. v33i2. 13815. **Acta Scientiarum. Human and Social Sciences**. v. 33, n. 2, p. 193-197, 2011. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciHumanSocSci/article/viewFile/13815/pdf>>. Acesso em: julho, 2016.

BANDOC, G.; PRĂVĂLIE, R. Climatic water balance dynamics over the last five decades in Romania's most arid region, Dobrogea. **Journal of Geographical Sciences**. 2015, 25(11): 1307-1327. DOI: 10.1007/s11442-015-1236-1. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11442-015-1236-1>>. Acesso em: março/2016.

BECHINI, L.; DUCCO, G.; DONATELLI, M.; STEIN, A. Modelling, interpolation and stochastic simulation in space and time of global solar radiation. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.81, p.29-42, 2000. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.384.906&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: maio/2016.

CARDOSO, C.T.V. **Probabilidade de Ocorrência de Deficiência Hídrica nos Solos da Região Central do Estado do Rio Grande do Sul**. 2005. 186f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

CARVALHO NETO, R.M. **Uso do Balanço Hídrico Climatológico para Subsidiar Tomadas de Decisão Quanto ao Manejo de Bacias Hidrográficas**. 2011. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2011.

CECÍLIO, R.A.; SILVA, K.R. da; XAVIER, A.C.; PEZZOPANE, J.R.M. Métodos para a espacialização dos elementos do balanço hídrico climatológico. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.47, n.4, p.478-488, abr. 2012. Disponível em: <<http://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/10202/6859>>. Acesso em: Abril/2016.

CHIAUDANI, A. **Agroclimatologia statica e dinamica del veneto analisi del periodo 1956-2004**. 2008. 161p. Tese (Doutorado Ciências das Produções Vegetais) - Università degli Studi di Padova, Pádua, Vêneto, Itália, 2008. Disponível em: <http://paduaresearch.cab.unipd.it/532/1/tesi_Chiaudani_finale.pdf>. Acesso em: maio/2016.

COSTA, F. F. DA; OLIVEIRA, G. D. DE; CAIXETA, P. R. C.; SANTOS; G. R. dos. Espacialização de precipitação máxima média com interpolador geoestatístico: krigagem. In: IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. **Anais...** Recife - PE, 06-09, Maio, 2012. p. 001 - 008. Disponível em: <https://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIV/CD/artigos/SIG/134_5.pdf>. Acesso em: julho, 2016.

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** 03 (2012) 694-707. Disponível em: <<http://www.revista.ufpe.br/rbgfe/index.php/revista/article/view/422/311>>. Acesso em: Março/20016.

D'ANGIOLELLA, G.; SILVA, J. de F. da. Balanço Hídrico Climatológico do Brasil. **In: Anais**. XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia. Fortaleza, 2004. Disponível em: <https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=http://www.cbmet.com/cbm-files/22-d6e61e791f3aef0808eddcecd59d09dd.doc>. Acesso em: fev/2016.

D'ANGIOLELLA, G. VASCONCELLOS, V.L.D.; ROSA, J.W.C. Estimativa e espacialização do balanço hídrico na mesorregião sul da Bahia. **In: Anais**. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 83-90

EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. Improvements on cross-validation: the 632+ bootstrap method. **Journal of the American Statistical Association**, v. 92, n. 438, p. 548-560, 1997. Disponível em: <http://www.stat.washington.edu/courses/stat527/s13/readings/EfronTibshirani_JASA_1997.pdf>. Acesso em: julho, 2016.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE - ESRI. **ArcGIS**. Sistema de Informação Geográfica para área de trabalho de computador, versão 10.2. 2014a. Disponível em: <<https://www.arcgis.com>>. Acesso em: agosto 2014.

_____. **ArcGIS Resource Center**. 2014b. Disponível em: <<http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/00300000000z000000>>; <<http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/003100000059000000>>. Acesso em: agosto/2014.

FRANCO, A. C. L.; UDA, P. K. Comparação de métodos de espacialização da precipitação na bacia do alto rio Negro, Santa Catarina. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa, PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, **Anais...** INPE, 2015. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0607.pdf>>. Acesso em: julho, 2016.

FREITAS, J. C. DE; DANTAS, R. T.; ANDRADE, A. R. S. DE; PEREIRA, E. R. R. Analysis of variability of climatic indexes for the state of the Paraíba – PB. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia** v.4, n.2, Mai/Ago (2011). Print-ISSN 1983-6325 (On line) e-ISSN 1984-7548. Disponível em: <<http://revistas.unicentro.br/index.php/repaa/article/view/1333>>. Acesso em: Março/2016.

GARCIA, A. Balanço hídrico de Ituverava (SP) sob condições de cenários climáticos futuros. **Nucleus**, v.7, n.1, p. 217 - 222. abr. 2010

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Mapas do Boletim Agroclimatológico**. 2016. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/html/agro.html>>. Acesso em: abril/2016.

KOHAVI, R. A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. In: **Ijcai**. 1995. p. 1137-1145. Disponível em: <<http://web.cs.iastate.edu/~jtian/cs573/Papers/Kohavi-IJCAI-95.pdf>>. Acesso em: julho, 2016.

LEAO, S. Mapping 100 Years of Thornthwaite Moisture Index: Impact of Climate Change in Victoria, Australia. **Geographical Research**. August 2014. 52(3):309–327 309 doi: 10.1111/1745-5871.12072. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1745-5871.12072/abstract>>. Acesso em: abril/2016.

LUCAS, D. D. P., HELDWEIN, A. B., MALDANER I. C., TRENTIN R., HINNAH F. D., SILVA J. R. DA. Excedente hídrico em diferentes solos e épocas de semeadura do girassol no Rio Grande do Sul. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.50, n.6, p.431-440, jun. 2015. DOI: 10.1590/S0100-204X2015000600001. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pab/v50n6/0100-204X-pab-50-06-00431.pdf>>. Acesso em : Março/2016.

NEVES, S. M. A. DA S.; NUNES, M. C. M.; NEVES, R. J. Caracterização das condições climáticas de Cáceres/MT - Brasil, no período de 1971 a 2009: subsídio às atividades agropecuárias e turísticas municipais. **B.goiano.geogr, Goiânia**, v. 31, n. 2, p. 55-68, jul./dez. 2011. Disponível em: <<https://revistas.ufg.emnuvens.com.br/bgg/article/view/16845/10255>>. Acesso em: março 2016.

ORLANDINI, D. et al. Potencialidades das regiões brasileiras para instalação de uma fábrica de celulose. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.35, n.5, p.1053-1060, 2011.

PEREIRA, A. R. Simplificando o Balanço Hídrico de Thornthwaite-Mather. **Bragantia**, Campinas, v.64, n.2, p.311-313, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052005000200019>. Acesso em: 2010.

PEREIRA, R. J. C. **Análise de Correlação entre Alterações na Cobertura Vegetal e o Comportamento Hidrológico na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira - RJ**. Rio de Janeiro, 2012. 86p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **Python Language Reference**. Versão 2.7. Disponível em: <<http://www.python.org>>. Acesso em: setembro, 2014.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. **Bases dos estudos de fauna, flora e recursos hídricos**. 3 vol. Porto Alegre: SEMA, 2010a. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/silvicultura/BasesEstudos_Fauna_Flora_RH.zip>. Acesso em: 17 jun. 2011.

_____. **Zoneamento ambiental da silvicultura**. Estrutura, metodologia e resultados. 1 vol. Porto Alegre: RIO GRANDE DO SUL, 2010b. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/silvicultura/V1_ZAS%20APROVADO%20CONSOLIDADO%20CORRIGIDO%20V-18-05-2010.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2013.

_____. **Zoneamento ambiental para atividade de silvicultura**. 1 vol. Porto Alegre: RIO GRANDE DO SUL, 2007.

SANTOS, G. O.; LIMA, F. B. DE; VANZELA, L. S. Balanço hídrico espacial das culturas inseridas na bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Rita, noroeste paulista. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**. v.7, n.º. 1, p. 03-16, 2013. ISSN 1982-7679 (On-line). Fortaleza, CE, INOVAGRI. DOI: 10.7127/rbai.v7n100091

SENTELHAS, P. C.; SANTOS, D. L.; MACHADO, R. E. Water deficit and water surplus maps for Brazil, based on FAO Penman-Monteith potential evapotranspiration. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 3, n. 3, p. 28-42, 2008. (doi:10.4136/ambi-agua.59). Disponível em: <[http://www.leb.esalq.usp.br/agmfacil/artigos/artigos_sentelhas_2008/2008_RevAmbi%20gua_3\(3\)_28-42_WDWSBrazil.pdf](http://www.leb.esalq.usp.br/agmfacil/artigos/artigos_sentelhas_2008/2008_RevAmbi%20gua_3(3)_28-42_WDWSBrazil.pdf)>. Acesso em: junho/2015.

SENI, G.; ELDER, J. F. Ensemble methods in data mining: improving accuracy through combining predictions. **Synthesis Lectures on Data Mining and Knowledge Discovery**. v. 2, n. 1, p. 1-126, 2010. Disponível em: <https://wiki.eecs.yorku.ca/course_archive/2014-15/F/4412/_media/ensemble_data_mining.pdf>. Acesso em: junho, 2016.

SILVA, D. C. V. da; ALMEIDA, E. G. de; LANA, J. T. de O.; HAMADA, E. Desenvolvimento de sistema de visualização do balanço hídrico climatológico do Brasil: VisBHClima. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 6., 2012, Jaguariúna. **Anais...** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2012. 1 CD ROM. Nº 12403. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/73718/1/2012AA022.pdf>>. Acesso em: Março/2016.

SILVA, D. C. V. da; HAMADA, E.; ALMEIDA, E. G. de; LANA, J. T. de O.; PEREIRA, R. A. S. M. Aplicativo para consulta e visualização do balanço hídrico climatológico do Brasil. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 5., 2011, Campinas. **Anais...** Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2011. 1 CD ROM. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/916323>>. Acesso em: Março/2016.

THORNTHWAITE, C.W. An approach towards a rational classification of climate. **Geographical Review**, London, v.38, p.55-94, 1948. Disponível em: <<https://www.unc.edu/courses/2007fall/geog/801/001/www/ET/Thornthwaite48-GeogrRev.pdf>>. Acesso em: 2012.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (Publications in Climatology, vol. VIII, n.1).

TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L. F. S. Evaporação e evapotranspiração. In: TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4 ed., Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2009. 943 p.

VAREJÃO-SILVA, M. A.; **Meteorologia e Climatologia**. Versão Digital 2, Recife. 2006. Disponível em: <http://www.icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf>. Acesso em: Jan/2016.

VARMA, S.; SIMON, R. Bias in error estimation when using cross-validation for model selection. **BMC bioinformatics**, v. 7, n. 1, p. 1, 2006. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1397873/>>. Acesso em: julho, 2016.

VALERIANO, M. M., PICINI, A. G. **Geoprocessamento de informações agroclimatológicas**. São José dos Campos: INPE, 2003. 133 p. (INPE-10128- RPQ/751). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/marciana/2003/12.09.09.48>>. Acesso em: Abril/2016.

6 ARTIGO 2 - IMPACTO DA DENSIDADE DE INFORMAÇÃO NA ESPACIALIZAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO E SUAS VARIÁVEIS EVAPOTRANSPIRAÇÃO E PRECIPITAÇÃO

Resumo

A densidade da informação utilizada para a espacialização da precipitação, evapotranspiração e, conseqüentemente, do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) é de grande importância na diminuição de incertezas nas suas respectivas representações espaciais. Este trabalho tem como objetivo investigar a influência da densidade de informações na espacialização do BHC e de suas variáveis: evapotranspiração e precipitação. Utilizou-se a estratégia de comparar as diferenças geradas nos resultados das interpolações da precipitação, da evapotranspiração e do cálculo do BHC espacializado, suprimindo estações e analisando o erro gerado por esse decréscimo de densidade de informação. Primeiro, a análise foi feita com a supressão de uma estação; depois, suprimindo duas, três e assim por diante. Portanto, este estudo não foi baseado em verdade de campo, mas as incertezas apontadas pelas diferentes densidades de informação simuladas, fazem referência a melhor situação apresentada no trabalho, ou seja, à maior disponibilidade de dados e estações. A área de estudo foi a planície de Vêneto, Região da Itália. Os dados de precipitação (P) e evapotranspiração (ET_o) foram espacializados pelo Inverso do Quadrado da Distância (IDW). Utilizou-se uma ferramenta, em linguagem de programação PythonTM, utilizando o *package* ArcPy®, para realizar os cálculos do BHC, de forma espacializada. Para suprir a dificuldade de analisar todas as combinações possíveis, utilizou-se de um indicador estatístico para determinar a suficiência amostral, de forma que representassem adequadamente o todo. O indicador utilizado foi obtido por amostragem iterativa. Concluiu-se que o BHC apresenta as maiores incertezas referentes à densidade de estações nos meses em que o armazenamento de água no solo mais sofre influência de entrada ou saída de água, e portanto, a representação espacial do BHC possui maiores incertezas no começo de épocas de estiagem ou de precipitações. Também pode-se concluir que a ausência de estações pode diminuir a percepção de déficit pelo modelo do BHC nesses meses que sofreram maior impacto da redução de densidade de estações. As incertezas estimadas para a redução de estações de 15 para 3, variaram de 3 a 27% para precipitação, de 1 a 36% para ET_o e de 1 a 88% para o BHC, considerando 16 estações como a verdade de referência. Considerando as densidades recomendadas pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM), esta análise de incertezas indica, para essa região, que as mesmas não são suficientes para boas avaliações do BHC. Isso pode indicar que ainda maiores incertezas podem ocorrer em regiões com densidade de informação inferior às analisadas neste trabalho, embora as mesmas sejam semelhantes às recomendações mínimas da OMM.

Palavras-Chave: Incertezas. Análise de Incertezas. Balanço Hídrico Espacializado. BHC. Déficit Hídrico. Excesso Hídrico. Thornthwaite.

INFORMATION DENSITY IMPACT IN THE SPACIALIZATION OF THE CLIMATIC WATER BALANCE AND ITS VARIABLES EVAPOTRANSPIRATION AND PRECIPITATION.

Abstract

The density of information used for the spatial distribution of precipitation, evapotranspiration, and consequently of the Climatic Water Balance (CWB) is of great importance in reducing uncertainty in their respective spatial representations. This study aims to investigate the influence of density information in the spacialization of the CWB and its variables: evapotranspiration and precipitation. This work uses the strategy of comparing the differences arising from the results of the precipitation and evapotranspiration interpolations and from the spacialized CWB calculation, taking stations out and analyzing the error generated by the decrease of information density. First, the analysis was done with the removal of one station; then, removing two, three and so on. Therefore, this study was not based on "field truth", but the uncertainties pointed by the different simulated information densities, are referred to the best situation presented in the work, that is, the greatest availability of data and stations. The study area was the plain area of Veneto, Region of Italy. The precipitation data (P) and the evapotranspiration (ETo) were spatialized by the Inverse Distance Weighting (IDW). A tool in the PythonTM programming language was utilized, using the ArcPy® package to perform the calculations of the spacialized CWB. To meet the difficulty of analyzing all the possible combinations, we used a statistical indicator to determine the sample sufficiency in order to properly represent the whole. The indicator used was obtained by iteratively sampling. It is concluded that the CWB is more sensitive to the density of stations in the months when the water storage in the soil suffers more influence by the incoming or out coming of water and thus the spatial representation of the CWB has greater uncertainty at the beginning of the dry or rainy season. It can also be concluded that the absence of stations may decrease the perception of deficit by the CWB model in these months that were more affected by the stations density reduction. The estimated uncertainties for the stations reduction from 16 to 3 ranged from 3 to 27% for precipitation, from 1 to 36% for ETo and 1 to 88% for the CWB, considering 16 stations as the truth reference. Considering the density recommended by the World Meteorological Organization (WMO), this uncertainty analysis indicates, for this region, that they are not sufficient for good ratings of the CWB. This may indicate that even greater uncertainties may occur in areas with lower density of information to those analyzed in this study and were similar to the minimum recommendations of the WMO.

Keywords: Uncertainties. Uncertainties Analysis. Spatialized Climatic Water Balance. CWB. Water Deficit. Water Surplus. Thornthwaite.

6.1 INTRODUÇÃO

A qualidade da informação utilizada para a espacialização da precipitação, evapotranspiração e, conseqüentemente, do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) é de grande importância na diminuição de incertezas nas suas respectivas representações espaciais. A densidade de informação possui alta relevância nessa espacialização, uma vez que se busca representar em forma de mapas, com o máximo de precisão, a realidade de seus comportamentos climáticos.

O BHC de Thornthwaite e Mather (1955) é entendido como um método climático utilizado para estimar o teor de água existente no solo disponível à comunidade vegetal (D'ANGIOLELLA et al., 2005). Para utilizá-lo de forma espacializada, faz-se importante compreender tal influência da densidade de informação na qualidade dos mapas gerados.

Para isso, este trabalho utiliza a estratégia de comparar as diferenças geradas nos resultados das interpolações da precipitação, da evapotranspiração e do cálculo do BHC espacializado, suprimindo estações e analisando o erro gerado por esse decréscimo de densidade de informação. Primeiro, a análise foi feita com a supressão de uma estação; depois, suprimindo duas, e assim por diante. Portanto, este trabalho tem como objetivo investigar a influência da densidade de informações na espacialização do BHC e de suas variáveis: evapotranspiração e precipitação.

Essa influência de densidade na espacialização do BHC, faz referência à melhor situação apresentada no trabalho, ou seja, à maior disponibilidade de dados e estações e não em uma "verdade de campo".

6.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

6.2.1 Balanço hídrico climatológico

Conforme Tucci e Beltrame (2009), o balanço hídrico visa à quantificação dos componentes de um determinado sistema hídrico, procurando o melhor entendimento do seu comportamento, e baseia-se no princípio de conservação de massa, sendo analisado pelas entradas e saídas de água do sistema.

Visando equacionar tais relações, surgiram diferentes métodos de se calcular o balanço hídrico em função do tipo de sistema e objetivo do estudo. O Balanço Hídrico Climatológico (BHC) de Thornthwaite e Mather (1955) é um dos métodos que apresentou grande difusão.

Esse método considera o solo como um ingrediente ativo no seu cálculo (D'ANGIOLELLA et al., 2005), pois tem o solo como um reservatório que dificulta a saída da água à medida que vai secando. Nos períodos em que o total de precipitação (P) é menor que a evapotranspiração potencial (ETP), a água retida torna-se uma função dessa demanda potencial ($P - ETP < 0$) e da Capacidade de Água Disponível (CAD) adotada nos cálculos. Havendo uma sequência de períodos nessa condição, a água retida no solo será uma função sequencial dos valores negativos acumulados de $P - ETP$, ou seja, da perda potencial acumulada (PEREIRA, 2005).

Como o BHC é utilizado em um contexto climático e necessita ser alimentado por dados referentes a longos períodos de observações, a densidade das estações que providenciam esses dados pode não ser o suficiente para a boa representação desse BHC quando espacializado.

Normais climatológicas utilizam dados referentes a 30 anos (WMO, 1989). Ao longo dos anos, com os acréscimos de estações às redes de monitoramento, a densidade de informação tem aumentado e proporcionado novas possibilidades de uso dessas informações, porém ainda em uma escala temporal não tão longa quanto a necessária para indicar clima.

Considerando que a densidade de informação pode ser melhorada com o passar do tempo, o uso do BHC espacializado poderá também variar nas suas incertezas quando pensado em forma regionalizada. Tais incertezas conduzem ao questionamento sobre quais os impactos da densidade de informação na espacialização do BHC.

6.2.2 Dimensionamento de Redes de Monitoramento

A construção de bases de dados adequadas, por meio de sistemas de monitoramento hidrológicos, é um pré-requisito fundamental para a gestão e avaliação dos recursos hídricos (WWO, 2009). Segundo Loucks e Beek (2005), monitoramento é o processo de observar o que está acontecendo.

A Organização Meteorológica Mundial - OMM (WWO, 2009), apresentou as linhas gerais de como as redes devem ser projetadas, com foco nas necessidades e objetivos dos projetos, sempre as relacionando ao custo-benefício envolvido.

Já Bales et al. (2004) apresentaram as linhas gerais do plano utilizado no Programa Nacional de Informação de Vazões dos Estados Unidos (*National Streamflow Information Program - NSIP*), o qual norteou o planejamento de vazões da Agência de Pesquisa Geológica dos Estados Unidos (*United States Geological Survey - USGS*), descrevendo amplamente todo o processo.

O grande desafio no monitoramento, segundo Loucks e Beek (2005), é fazer com que o dado obtido se encaixe às necessidades de informação e então se possa agir sobre essa informação, como e quando for apropriado. Isso é chamado pelos autores de "gestão adaptativa", pois, ao longo do tempo, os gestores devem ser capazes de melhorar a sua gestão e as suas políticas de monitoramento, baseados no que aprendem sobre o sistema que eles estão gerindo.

Loucks e Beek (2005) também apontam dois indicadores de qualidade para o monitoramento, explicando que o sucesso no monitoramento pode ser expresso por: "efetividade" e "eficiência", em que "efetividade" refere-se a quanto a informação obtida pelo monitoramento responde às necessidades desse monitoramento e ao seu acréscimo de informação e conhecimento, enquanto que "eficiência" refere-se a obter a informação com os custos mais baixos possíveis, tanto financeiramente como de pessoal.

Um indicador de qualidade de densidade de estações aceito, com padrões mínimos, são as recomendações da OMM (WMO, 2008), que apontam diferentes densidades de estação por km², conforme sua finalidade e a unidade fisiográfica em que a região estiver inserida, encontrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Recomendação de densidade mínima de estações, por tipo de estação, para rede hidrometeorológica, segundo a OMM.

Unidades Fisiográficas	Pluviômetro*	Pluviógrafo**	Evaporação
Litoral / Região Costeira	900	9.000	50.000
Montanhas	250	2.500	50.000
Planícies Interioranas	575	5.750	5.000
Ondulada / Montanhosa	575	5.750	50.000
Pequenas Ilhas (< 500 km²)	25	250	50.000
Áreas Urbanas	-	10 a 20	-
Polar / Árida	10.000	100.000	100.000

Fonte: Adaptado de WMO (2008).

* Estação Manual e ** Estação Automática (CHICO e DZIEDZIC, 2015).

Alguns trabalhos sobre dimensionamento e qualidade de redes de monitoramento utilizaram as recomendações da OMM (WMO, 2008) como diretrizes para alcançar a densidade ideal. É o caso de Chico e Dzedzic (2015), Marcuzzo e Melati (2015), Melati e Marcuzzo (2015) e Junior et al. (2006).

Chico e Dziedzic (2015) desenvolveram uma metodologia para concepção de uma rede de monitoramento de recursos hídricos em Angola, propondo princípios e critérios para implementação de uma rede de monitoramento de recursos hídricos com base nas diretrizes definidas pela Lei de Águas de Angola e regulamentos complementares.

Para a concepção da rede, Chico e Dziedzic (2015) identificaram e avaliaram, por meio da análise bibliográfica, as bases e os princípios que caracterizam um sistema de monitoramento de recursos hídricos para obtenção de dados quantitativos e qualitativos. Os autores consideraram referências de contribuições metodológica, científica e tecnológica aos sistemas de monitoramento de recursos hídricos dos Estados Unidos, França, Brasil, Portugal, África do Sul e Moçambique.

O número de estações foi estabelecido pelos autores separadamente, conforme a finalidade de cada estação, com base na recomendação de densidade mínima da WMO (2008), na classificação das zonas fisiográficas baseadas na distribuição espacial e sazonal da precipitação. Para isso, Chico e Dziedzic (2015) dividiram a superfície de Angola segundo as unidades geomorfológicas em conformidade com as unidades fisiográficas equivalentes à classificação da OMM (WMO, 2008), com base nos mapas geomorfológicos e hipsométricos de Angola.

Já a localização das estações foi definida pelos autores com base nos critérios recomendados por Bales et al. (2004), Loucks e Van Beek (2005), Mirsha e Coulibaly (2008), e WMO (2008 e 2009), para os casos práticos estudados e nas características hidrológicas, físico-climáticas, e socioeconômicas de Angola. Dentre os critérios, foram observadas zonas com características físico-climáticas homogêneas ou similares, a ordem do rio e sua área de drenagem, as confluências dos principais afluentes, áreas com rochas e/ou solos suscetíveis à erosão, combinando com os aspectos de uso e ocupação do solo, densidade demográfica e grau de atividade econômica, dispersão e comprimento de mistura.

Considerando esses critérios, os autores (CHICO e DZIEDZIC, 2015) propuseram um sistema de monitoramento conforme o tipo de estação, o número de estações a implementar em cada etapa do processo, o tipo de medição adotado (contínua ou periódica) para cada rede, as variáveis a monitorar, a periodicidade das medições e as principais justificativas para a implantação da rede nos termos curto, médio e longo.

Os autores testaram a metodologia em bacias hidrográficas típicas de Angola, com auxílio de um sistema de informação geográfica (SIG) como ferramenta para a distribuição espacial das estações, permitindo o georreferenciamento de dados e sua integração a um

banco de dados contendo informações hidrográficas, divisão político-administrativa e infraestrutura rodoviária e ferroviária.

Marcuzzo e Melati (2015) e Melati e Marcuzzo (2015) também basearam-se nas recomendações da OMM e realizaram cálculo de densidade das estações existentes em suas respectivas áreas de estudo, apontando em seus trabalhos, a quantidade e as possíveis posições para novas estações, considerando que esses acréscimos trariam maior qualidade aos dados gerados atualmente. Os autores (op. cit.), por meio da análise da distribuição das declividades (LADEIRA NETO, 2013), dividiram as sub-bacias pertencentes às suas respectivas áreas de estudo, em classes de relevo conforme às declividades predominantes, encaixando-as às unidades fisiográficas montanha, planície interiorana, litoral, etc. (Tabela 4), conforme a OMM (WMO, 2008), seguindo as orientações da EMBRAPA (2006), com auxílio de programa com Sistema de Informação Geográfica, criador e gerenciador de mapas ArcGIS® versão 10.2 (ESRI, 2014a).

Na recomendação de novas estações, tanto Marcuzzo e Melati (2015) como Melati e Marcuzzo (2015), analisaram critérios para disposição espacial das novas estações pluviométricas e pluviográficas propostas, por meio da análise espacial das estações já existentes e em operação, com dados atualizados no banco de dados do inventário da ANA obtidos por meio do Hidroweb (BRASIL, 2013), com o intuito de complementar a atual rede de monitoramento. Além da recomendação de densidade de estações da OMM (WMO, 2008), outros critérios para escolha do local adequado foram analisados pelos autores, como terrenos planos, observador em potencial, distância de obstáculos e proximidade de estradas. Esses outros critérios foram colocados em prática por observação dos locais, por meio de imagens do Google Earth.

De forma semelhante à metodologia utilizada por Marcuzzo e Melati (2015) e Melati e Marcuzzo (2015), Junior et al. (2006) realizaram estudo sobre a qualidade da distribuição espacial da rede meteorológica convencional e automática no estado de Pernambuco, baseando-se nas recomendações de densidade de estações da OMM (WMO, 2008).

Junior et al. (2006) dividiram cada uma das 3 regiões do estado, Sertão, Agreste e Zona da Mata/Litoral, em 6 microrregiões geográficas (18 no total) e caracterizaram cada microrregião conforme as unidades fisiográficas apresentadas na Tabela 4.

Os autores verificaram que, de forma geral, a rede do estado satisfazia as recomendações de densidade da OMM, mas apresentava debilidades quanto à distribuição da rede, pois nem todas as microrregiões satisfaziam as recomendações da OMM e, no ponto de vista político-administrativo, 20 municípios ainda não possuíam pluviômetros.

Sendo assim, Junior et al. (2006) recomendaram um número de novas estações por microrregião, sem apontar os locais, apenas indicando a quantidade de estações a serem criadas totalizando 37 novos pontos de coleta no estado. Os autores recomendaram a instalação de termopluviômetros e plataformas de coletas de dados (PCD) pela qualidade das informações e pelo acesso aos dados em tempo real, afirmando que estas novas estações trariam maior qualidade de informação aplicadas à agricultura, defesa civil, turismo, entre outros.

Considerando as recomendações de densidade de estações da OMM que são um patamar mínimo indicador de qualidade, é de se esperar que densidades inferiores às recomendações produzam grandes incertezas nas espacializações de P, ETo e BHC. Porém, ao considerar densidades superiores às recomendadas, algumas dúvidas surgem sobre estas incertezas: densidades superiores contém qual magnitude de incertezas? Como se pode identificar e quantificar as incertezas referentes à densidade de estação? Apesar de custos, densidades maiores que as mínimas da OMM podem minimizar incertezas na espacialização da P, ETo e do BHC?

Rios Gaona et al. (2015) identificaram e quantificaram as fontes de incerteza presente nos mapas de intensidade de precipitação interpolados a partir de linhas de celular. Os autores dividiram as fontes de erros e incertezas em duas categorias: (1) aqueles associados com às medições individuais de micro-ondas das linhas; (2) aqueles associados à metodologia de interpolação e à densidade espacial da rede, ou seja, ao mapeamento.

Os autores computaram um total de 3500 mapas de precipitação com dados reais (medições efetivas da linha) e dados simulados de linhas de celular (≈ 1.751 linhas), por 12 dias, nos Países Baixos (≈ 35.000 km²). A densidade da informação utilizada para a geração dos mapas de precipitação das linhas foi de ≈ 20 km²/linha (área urbana e rural), ou seja, bem superior às recomendações da OMM. A intensidade de precipitação simulada da linha referiu-se à intensidade de precipitação no ponto intermediário da linha de celular, obtidos a partir da média ponderada dos pixels dos mapas de radar que estavam sob a linha em questão. Os dados de precipitação de radar foram assumidos como referência (verdade absoluta) por serem de qualidade controlada, calibrados por dados medidos.

Rios Gaona et al. (2015) compararam pixel a pixel, os mapas interpolados de precipitação das linhas de celular com aos dados de precipitação do radar (assumido como verdade absoluta) por meio de gráficos de dispersão de densidade, considerando três indicadores: tendência (inclinação) relativa, coeficiente de variação (C.V.) e coeficiente de determinação (r^2).

Para quantificar os erros e incertezas, os autores compararam mapas de precipitação criados a partir de três conjuntos de intensidade de precipitação das linhas: (1) medições efetivas da linha; (2) medições simuladas da linha com a disponibilidade efetiva da rede, onde foram simulados valores de precipitação, a partir dos dados de radar, para os mesmos períodos de dados da medição efetiva da linha e mesmas linhas, simulando um cenário em que os valores das medições efetivas da linha não apresentassem erros associados às medições das linhas; (3) medições simuladas da linha assumindo-se 100% da disponibilidade da rede, onde foram simulados valores de precipitação, a partir dos dados de radar inclusive para as linhas que apresentavam dados inadequados ou nenhum dado, simulando um cenário ótimo em que os valores das medições efetivas da linha também não apresentassem erros associados às medições das linhas.

Como as intensidades de precipitações simuladas das linhas não foram afetadas pelos erros e incertezas atribuídos às medições efetivas da linha pois foram simuladas a partir dos dados de radar, Rios Gaona et al. (2015) puderam estimar as incertezas atribuídas apenas ao mapeamento.

Os autores avaliaram intensidades de precipitação em mapas de 15 min e mapas diários, que foram a soma de 4 mapas de 15 min. Os mapas diários de precipitação de linhas de celular mostraram menos incertezas em comparação aos mapas de 15 min de precipitação, porque os erros presentes nos mapas de 15 min tenderam a anularem-se mutuamente quando foram agregados.

Rios Gaona et al. (2015) verificaram que os erros de medição são a fonte de erro que mais contribuem para as incertezas nos mapas de precipitação gerados a partir das linhas de celular. Com relação aos erros e incertezas de mapeamento, os autores apontaram que os mapas interpolados por krigagem a partir de intensidades de precipitação simulada de linhas de celular representaram o resultado de um processo em que um elemento linear (trajeto da linha) obtido a partir da média de amostras de volume (dados do radar) foi atribuído a um ponto (ponto médio do trajeto da linha). Segundo os autores, a mudança arbitrária de linha para ponto introduz uma fonte de erro que é implicitamente incluída aos erros relacionados ao mapeamento.

Ainda em relação aos erros e incertezas de mapeamento, Rios Gaona et al. (2015) verificaram que, até mesmo o melhor cenário mostrou uma quantidade remanescente e significativa de incerteza. Os autores atribuíram tais incertezas à variabilidade espaço-temporal das precipitações, sendo esta variabilidade tal que exigiria uma rede ainda mais densa e robusta de linhas de celulares para gerar mapas de precipitação mais precisos para a

escala da área de estudo, ou seja, a uma densidade que já é bem superior às recomendações da OMM, precisaria ser ainda mais superior.

Já Aziz et al. (2016) apontaram um meio de se verificar redundâncias nas medições de precipitação e diminuir a densidade de informação. Os autores utilizaram a combinação de métodos de geoestatística e "otimização por enxame de partículas" (*Particle Swarm Optimization*) em um algoritmo de otimização, que pode ser utilizado em modelos de design de rede de pluviômetros. Segundo os autores, a metodologia pode melhorar a rede existente, minimizando os valores estimados de variância.

Estes autores verificaram que o valor da variância estimada diminuiu à medida que o número de pluviômetros aumentou, atingindo um ponto de estagnação (saturação) na curva "Variância vs Número de Estações". Segundo os autores, quando a curva alcança tal estagnação, este é o número de estações pluviométricas ideais. Aziz et al. (2016) verificaram que o número ótimo de estações para a área de estudo seriam de 67 estações ao invés das 84 estações existentes, apontando assim que 17 destas eram redundantes e poderiam ser realocadas para otimizar a rede.

De forma similar a Aziz et al. (2016), Pardo-Igúzquiza (1998) também utilizou o método de redução de variância geoestatística para estabelecer uma rede ideal de precipitação mas não só minimizando a variância mas também considerando o custo econômico da coleta de dados em suas simulações.

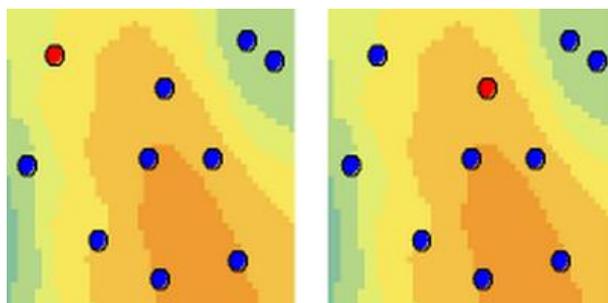
6.2.3 Análise da densidade de estações na qualidade da informação

Uma das principais dificuldades na representação espacial de variáveis obtidas pontualmente, como as variáveis hidrológicas precipitação e evapotranspiração, é conhecer qual a densidade de estações com dados que minimizam as incertezas na sua espacialização, conforme foi visto no item anterior.

Um método que pode ser utilizado para se compreender a influência de uma estação na interpolação de uma variável é a validação cruzada (VARMA e SIMON, 2006; SENI e ELDER, 2010; KOHAVI, 1995; EFRON e TIBSHIRANI, 1997). Na Figura 6, 10 pontos são usados para ilustrar o método da validação cruzada. O primeiro ponto vermelho é omitido na interpolação, que é realizada com os 9 pontos azuis. O valor estimado pela interpolação é confrontado com o valor real que foi omitido (ponto vermelho). Essa simulação é feita, então, para o segundo ponto vermelho e, assim, sucessivamente, até ser feita para cada uma das

estações, resultando em estimativas de erro pontuais para cada estação (valor estimado - valor observado).

Figura 6 - Ilustração da Validação Cruzada.



Fonte: ESRI (2014b).

Esses erros pontuais para cada estação são indicadores que auxiliam na diminuição de incertezas advindas dos métodos de representação espacial utilizados na validação cruzada pois servem como indicadores na escolha de um ou outro método interpolador ou até mesmo na escolha entre modelos de representação espacial, como é o caso do BHC.

A validação cruzada comumente utilizada (FRANCO e UDA, 2015; BECHINI et al., 2000; CECÍLIO et al., 2012; ALVES e VECCHIA, 2011; COSTA et al., 2012), retira cada estação, uma por vez, e apresenta a influência do modelo que se está avaliando, naquele ponto, em forma de erro. Por analogia, pode-se estender esta ideia da validação cruzada, que é feita retirando-se apenas uma estação por vez, para retirarem-se não apenas uma, mas 2, 3, 4, até um limite desejado e assim compreender a influência desta variação de densidade de informação em uma espacialização.

Uma metodologia semelhante a esta foi utilizada por Consensa (2012) que analisou o número de coletores necessários para medir a precipitação interna em povoamentos de *Eucalyptus* spp. sorteando amostras de 4 em 4 coletores até chegar nos 60 coletores amostrados a campo, verificando assim a influência de mais ou menos pluviômetros na representatividade da precipitação interna de uma floresta de eucaliptos.

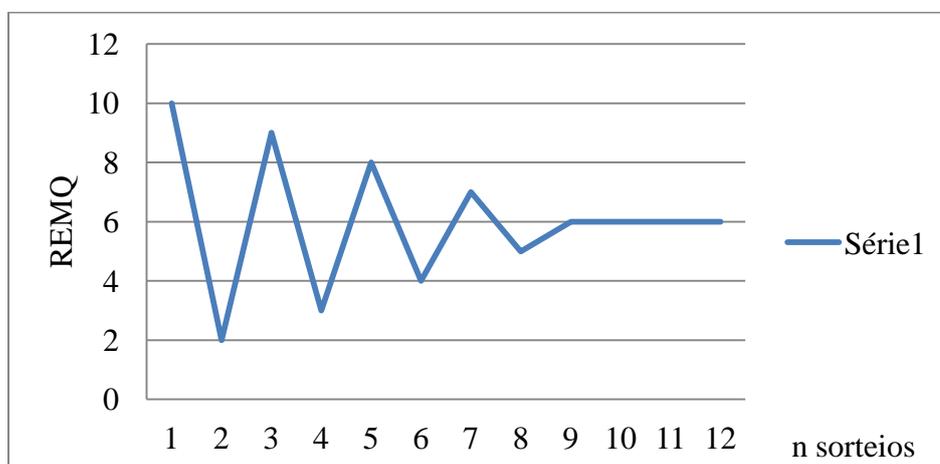
Sendo assim, estas simulações previstas podem necessitar de grande processamento e requerer artifício estatístico para identificar o número mínimo de simulações a serem representativas, ou seja, quantas amostras (suficiência amostral) serão necessárias para apontar satisfatoriamente os erros gerados ao longo do decréscimo de estações.

A amostragem se faz necessária quando não é possível ou não é conveniente acessar a totalidade de um dado universo amostral ou população, portanto, em qualquer levantamento será sempre necessário avaliar se o tamanho da amostra é suficiente (LIMA et al., 2011; SCHILLING e BATISTA, 2008), bem como a qualidade das amostras para não comprometer o trabalho (DEVORE, 2006). Este "suficiente" é chamado de suficiência amostral.

Pillar (2004) descreve algumas formas de determinar a suficiência amostral. Uma delas é a chamada amostragem interativa. Segundo o autor, a amostragem interativa encontra suporte na relação entre precisão e estabilidade. Quanto mais precisa a estimativa de um atributo, mais estável será a medida deste atributo quando obtido de outras amostras de tamanho maior. Isso se dá pois, nessa abordagem, o estado de um dado atributo obtido a partir da amostra, evolui e atinge estabilidade à medida em que se aumenta o número de unidades amostrais. Sendo assim, o tamanho suficiente de amostra será quando o fato de agregarem-se novas unidades amostrais à amostra resulta em alterações relativamente menores no valor do atributo considerado e este atributo, simples ou complexo, de interesse, começa apresentar estabilidade.

Segundo Pillar (2004), se o objetivo é estimar a média de alguma variável, o tamanho suficiente da amostra será aquele em que a média desta amostra atinge estabilidade, conforme ilustrado na Figura 2. Neste exemplo teórico e apenas ilustrativo, a curva demonstra estabilizar o atributo aqui considerado como a Raiz do Erro Médio Quadrático (REM_Q), aos 9 sorteios, indicando assim que, a partir deste ponto, os próximos sorteios, ou simulações, não adicionarão grandes diferenças à média.

Figura 2 - Exemplo ilustrativo do comportamento da curva da Raiz do Erro Médio Quadrado (REM_Q) com o aumento de sorteios.



Outra maneira de se apontar a suficiência amostral é o fechamento amostral por saturação teórica, que é uma ferramenta conceitual frequentemente empregada nos relatórios de investigações qualitativas na área da Saúde (ALVES et al., 2015; FONTANELLA e MAGDALENO JÚNIOR, 2012; CHVATAL et al., 2009) e possui uma abordagem semelhante à lógica da amostragem iterativa no fato em que os resultados, em certo momento, alcançam tendência à estagnação e se tornam, portanto, representativos.

O fechamento amostral por saturação teórica é operacionalmente definido como a suspensão de inclusão de novos participantes quando os dados obtidos passam a apresentar, na avaliação do pesquisador, uma certa redundância ou repetição, não sendo considerado relevante persistir na coleta de dados. Sendo assim, as informações fornecidas pelos novos participantes da pesquisa pouco acrescentariam ao material já obtido, não mais contribuindo significativamente para o aperfeiçoamento da reflexão teórica fundamentada nos dados que estão sendo coletados (FONTANELLA et al., 2011; FONTANELLA et al., 2008; FRANCIS et al., 2010).

Ainda seguindo uma lógica similar às anteriores, que apontam um ponto de saturação conforme as amostras, a curva de acumulação de espécies é utilizada na área da ecologia, em estudos fitossociológicos, para determinar suficiência amostral. Neste caso a definição de um tamanho ótimo de amostra está baseado na ideia de que quanto maior o tamanho da amostra, maior será o número de espécies que será encontrado, porém à uma taxa decrescente, até o ponto em que a curva é estabilizada, tornando-se horizontal. Esse ponto indica a área mínima necessária para representar uma comunidade (SCHILLING e BATISTA, 2008; SCOLFORO et al., 2008; GAMA et al, 2001).

Pillar (2004) também descreve o método “bootstrap” como uma forma para determinar a suficiência amostral que também utiliza uma lógica similar de saturação do amostrador. O autor define o método “bootstrap” como uma reamostragem da própria amostra que permite avaliar o grau de estabilidade quando combinado a uma amostragem iterativa. Esta reamostragem permite calcular a precisão de estimativas por meio de limites de confiança ou probabilidades, porém vale ressaltar que o autor indica que, cada reamostragem seja feita um grande número de vezes, sendo 1000 o mínimo de vezes, o que pode, conforme a utilização do método, requerer um alto processamento de dados.

A reamostragem bootstrap pode ser utilizada para a obtenção de suficiência amostral em análise de agrupamentos aplicada na área da ecologia, objetivando classificar unidades amostrais como ecossistemas, comunidades, ou indivíduos (PILLAR, 2004). Missio et al. (2014) identificaram a suficiência amostral das características anatômicas da madeira de uma

espécie florestal lenhosa por meio de bootstrap. Kuhnem Júnior et al. (2013) utilizaram bootstrap nos tratos estatísticos realizados na identificação de características patogênicas de isolados do complexo *Fusarium graminearum* e de *Fusarium verticillioides* em sementes e plântulas de milho.

6.3 MATERIAL E MÉTODOS

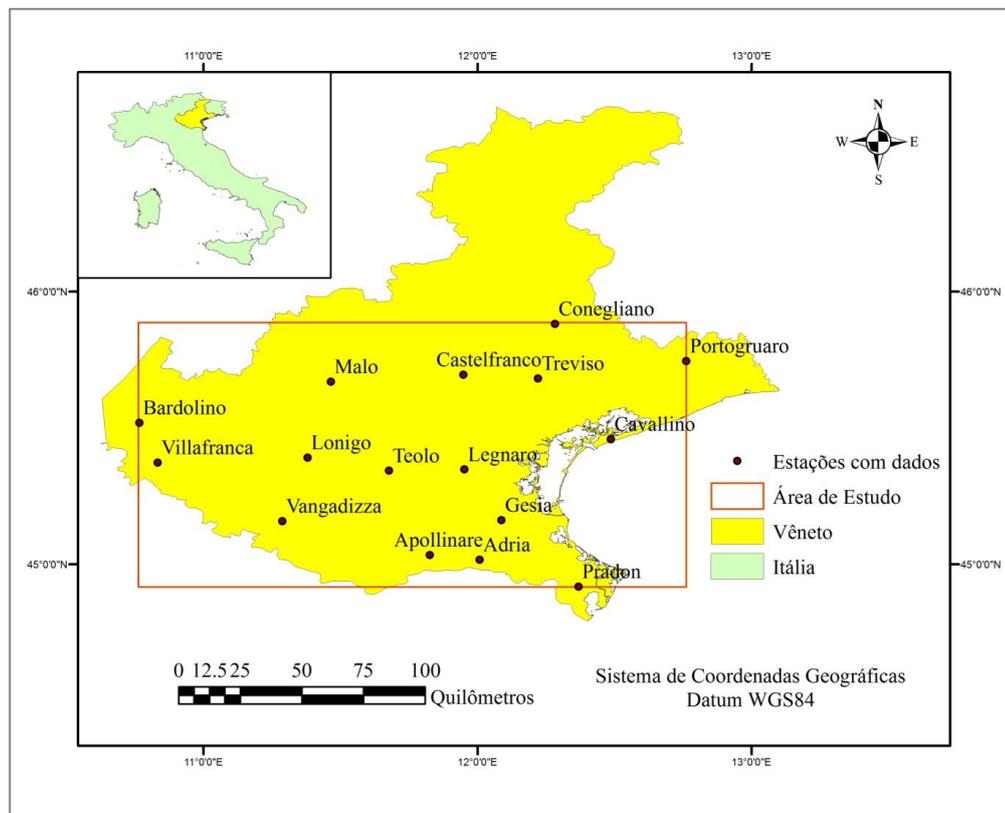
6.3.1 Área de estudo

A área de estudo deste trabalho foi a planície de Vêneto, Região da Itália. Utilizou-se desta área mais homogênea (área plana), para minimizar as incertezas advindas das altas altitudes dos Alpes ao norte da Itália.

Na planície de Vêneto prevalece um clima com um grau notável de continentalidade com invernos rigorosos e verões quentes. Mas o traço mais característico é a umidade elevada, especialmente nas áreas naturalmente irrigadas, o que torna o verão abafado e dá origem a nevoeiros frequentes e densos durante o inverno. A precipitação é distribuída de forma bastante equilibrada ao longo do ano, exceto no inverno que é a estação mais seca (CHIAUDANI, 2008).

Os dados utilizados no trabalho são oriundos da *Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto* (ARPAV, 2014). Foram selecionadas as estações com dados disponíveis para as análises, sendo estes, dados de precipitação (P), umidade relativa, velocidade do vento e temperatura. As estações que atendiam tais exigências foram 16 e estão identificadas na Figura 3 e na Tabela 2. Todas as estações são automáticas e disponibilizam dados horários.

Figura 3 - Localização das estações climatológicas de Vêneto, Itália, utilizadas no trabalho.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 2 - Estações utilizadas no estudo e período com dados.

Estação	Código*	Lat°	Long°	Período com dados selecionados	
				Precipitação, Temperatura e UR**	Vento
Adria	115	45,02	12,01	19/02/1992 a 31/12/2012	01/08/2003 a 31/12/2012
Apollinare	231	45,03	11,83	01/01/1998 a 31/12/2012	12/08/2003 a 31/12/2012
Bardolino**	118	45,52	10,77	01/01/1992 a 31/12/2001	01/01/1992 a 31/12/2012
Castelfranco	102	45,69	11,95	04/02/1992 a 31/12/2012	18/05/1992 a 31/12/2012
Cavallino	160	45,46	12,49	01/02/1992 a 31/12/2012	01/02/1992 a 31/12/2012
Conegliano	100	45,88	12,28	19/02/1992 a 31/12/2012	19/02/1992 a 31/12/2012
Gesia	178	45,16	12,09	02/01/1996 a 31/12/2012	01/04/1998 a 31/12/2012
Legnaro	111	45,35	11,95	06/02/1992 a 31/12/2012	22/09/2001 a 31/12/2012
Lonigo	105	45,39	11,38	01/01/1992 a 31/12/2012	01/01/1992 a 31/12/2012
Malo	134	45,67	11,46	01/04/1992 a 31/12/2012	02/07/1992 a 31/12/2012
Portogruaro	159	45,75	12,76	01/02/1992 a 31/12/2012	01/02/1992 a 31/12/2012
Pradon	101	44,92	12,37	01/01/1992 a 31/12/2012	01/01/1992 a 31/12/2012
Teolo	170	45,34	11,68	19/02/1992 a 31/12/2012	19/02/1992 a 31/12/2012
Treviso	220	45,68	12,22	01/03/2002 a 31/12/2012	01/03/2002 a 31/12/2012
Vangadizza	131	45,16	11,29	01/01/2002 a 31/12/2012	01/01/2002 a 31/12/2012
Villafranca	104	45,37	10,83	01/01/1992 a 31/12/2012	07/05/1992 a 31/12/2012

Fonte: Próprio autor.

* Identificação referente à ARPAV; ** Para Umidade Relativa (UR), Bardolino teve período de 01/01/1992 a 31/12/2012.

Na Figura 3, a área de estudo está representada por um retângulo vermelho de aproximadamente 17.000 km². Considerando as 16 estações utilizadas no trabalho, chega-se a 1.062,5 km² para cada estação. Considerando as recomendações de densidade de estações da OMM (Tabela 4), verifica-se que a rede utilizada neste trabalho (ARPAV, 2014) apresenta boa densidade de informação conforme as recomendações da OMM, pois a área de estudo possui parte litorânea e parte de planície interiorana. Para P, a recomendação mínima para a área litorânea é de 9000 km², enquanto que para a área de planície interiorana é de 5.750 km². Já para evapotranspiração, as recomendações são de 50.000 km² por estação para áreas litorâneas e 5.000 km² para planícies interioranas. As estações, com os respectivos períodos de observações encontram-se na Tabela 2.

Os dados de P e evapotranspiração foram trabalhados para representarem as normais climatológicas de cada variável utilizada, seguindo a metodologia do BHC, ou seja, valores médios de cada variável para cada mês do ano. A evapotranspiração potencial, neste trabalho considerado a evapotranspiração de referência (ET_o), foi calculada pelo método de Penman-Monteith simplificado (ALLEN et al., 1998).

Na Figura 4, na Figura 5 e na Figura 6 podem ser conferidas, respectivamente, as precipitações médias, as evapotranspirações potenciais médias e os BHC médios de longo período para cada mês do ano, em cada estação, que caracterizam o clima da região.

Figura 4 - Gráfico da precipitação (P) média de Vêneto.

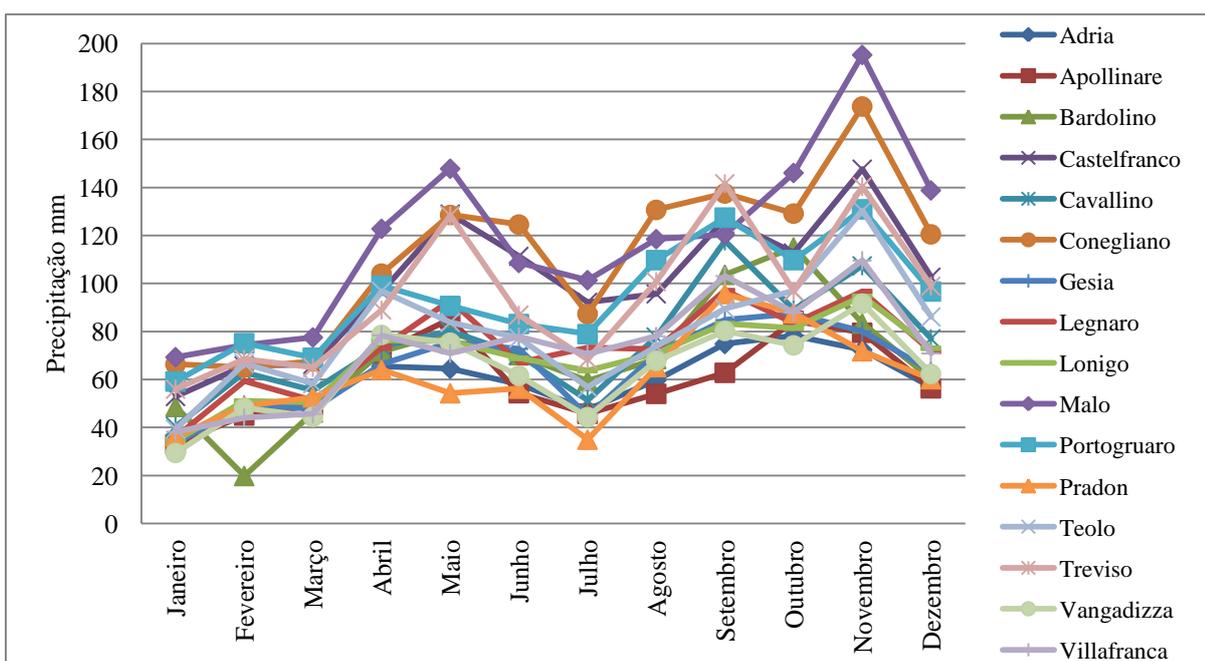
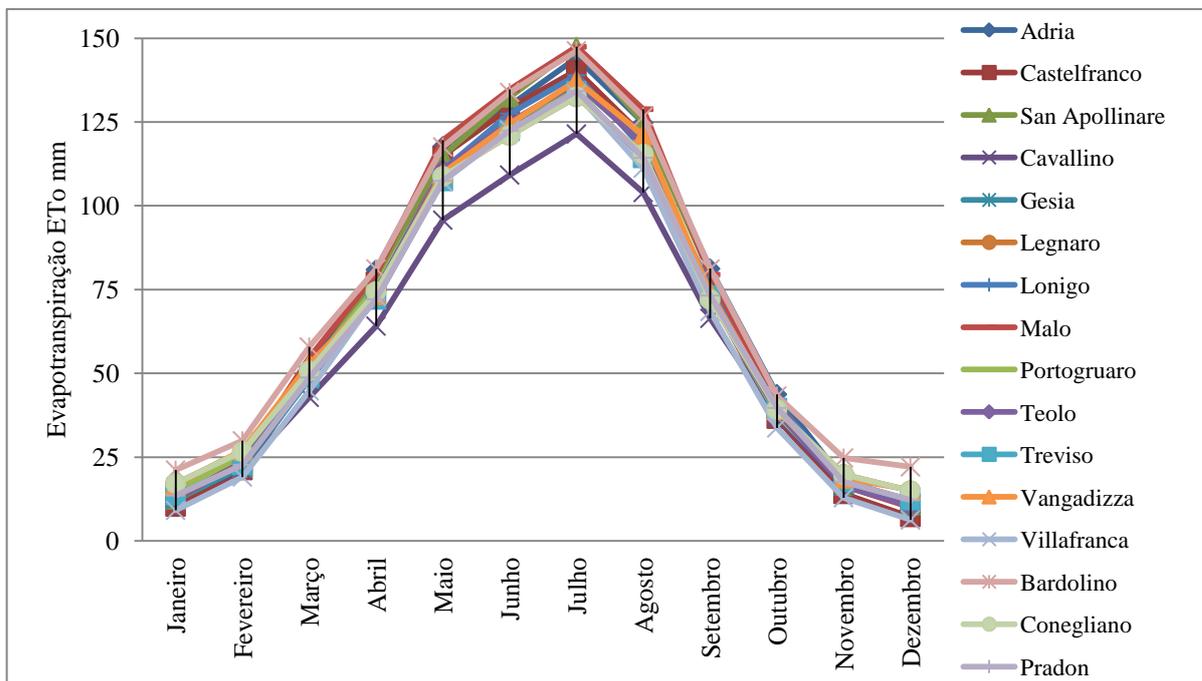
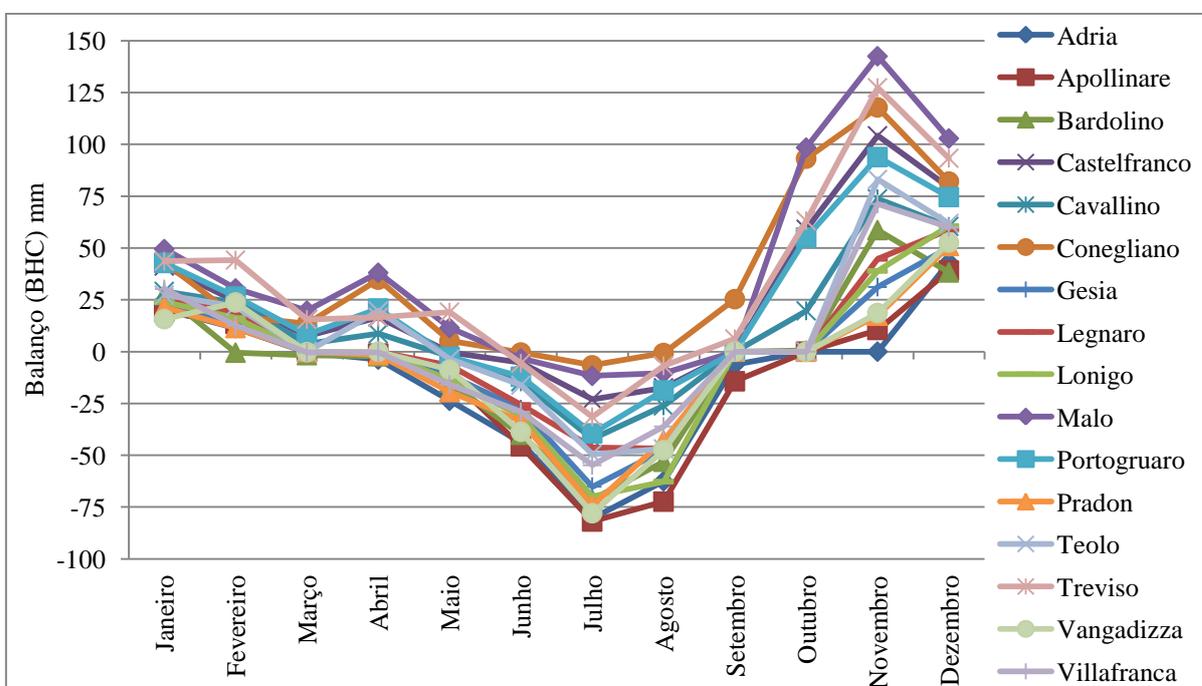


Figura 5 - Gráfico da evapotranspiração de referência (ET_o) média de Vêneto.



Fonte: Próprio autor.

Figura 6 - Gráfico do balanço hídrico (BHC) em cada estação climatológica de Vêneto.

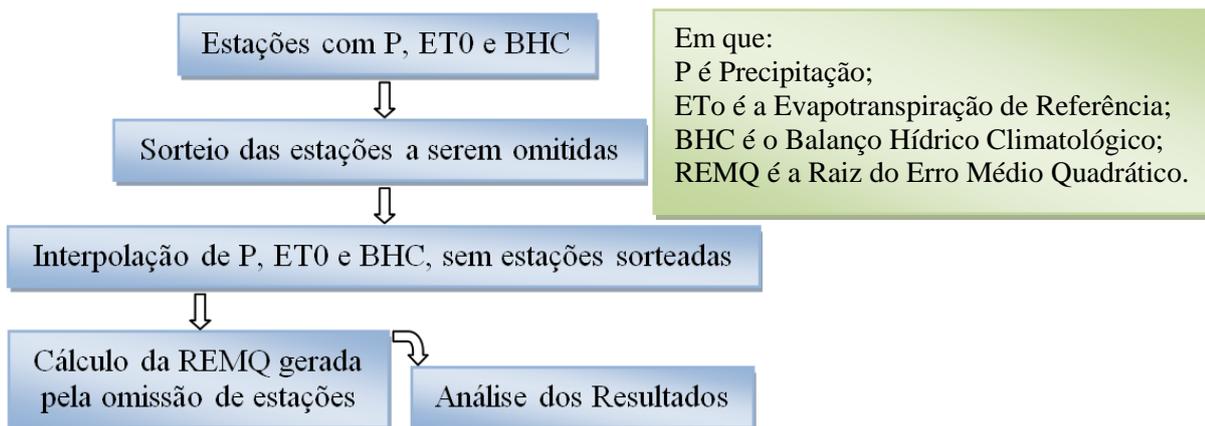


Fonte: Próprio autor.

6.3.2 Metodologia

As etapas metodológicas realizadas no trabalho podem ser observadas no fluxograma da Figura 7.

Figura 7 - Fluxograma das etapas metodológicas



Fonte: Próprio autor.

Os dados de precipitação (P) e de evapotranspiração (ETo) foram espacializados pelo método Inverso do Quadrado da Distância ou Inverso da Potência das Distâncias, do inglês *Inverse Distance Weighting* (IDW), com o uso do Programa ArcGIS® (ESRI, 2014a) *datum* WGS84 e resolução de 500 x 500 metros.

O BHC calculado neste trabalho, teve como dados de entrada:

- a) P: média das P para cada mês do ano;
- b) ETo: valores médios de ETo para cada mês do ano;
- c) Capacidade de Água Disponível (CAD): considerado um valor de 100 mm para toda a área.

Utilizou-se uma ferramenta, em linguagem de programação Python™ (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2014) utilizando o *package* ArcPy®, para realizar os cálculos do BHC espacializado, conforme o proposto por Thornthwaite e Mather (1955).

A análise foi feita para as duas variáveis (P e ETP) mais o BHC (totalizando 3 situações). Considerando que, para cada um dos meses do ano (12 situações), simulando as interpolações para cada conjunto de estações em um âmbito de 3 (mínimo utilizado na interpolação) a 15 estações, tem-se que a análise de todas as possibilidades se tornaria

extremamente morosa e pesada para o processamento. Assim, apresenta-se na Tabela 3 a análise combinatória, com o total de possibilidades de análise para apenas uma variável.

Tabela 3 - Possibilidades da análise combinatória de uma variável conforme o número de estações e variação da densidade de estações na área de estudo.

Nº Estações	Possibilidades	Área/estações em km²
15	16	1133,3
14	240	1214,3
13	3.360	1307,7
12	43.680	1416,7
11	524.160	1545,5
10	5.765.760	1700,0
9	57.657.600	1888,9
8	518.918.400	2125,0
7	4.151.347.200	2428,6
6	29.059.430.400	2833,3
5	174.356.582.400	3400,0
4	871.782.912.000	4250,0
3	3.487.131.648.000	5666,7
TOTAL	4.567.064.833.216	

Fonte: Próprio autor.

Para suprir essa dificuldade de analisar todos os resultados possíveis, incluindo a análise de P, ETo e BHC, utilizou-se de um indicador estatístico para determinar a suficiência amostral, de forma que representassem adequadamente o todo. O indicador utilizado foi obtido por amostragem iterativa, conforme descrito por Pillar (2004), que consiste em identificar o ponto do início do equilíbrio de uma média acumulada ao longo de uma série longa de amostragens. Neste trabalho, estas amostras são simulações de mapas, gerados por sorteio de um número (conjunto) de estações, semelhante à Figura 6.

Para simular a qualidade da informação em uma região com apenas 3 estações, simulou-se um número de mapas, conforme o indicado pela suficiência amostral, e a média acumulada da Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) foi o indicador desta qualidade. A REMQ é um indicador estatístico que evidencia os erros em módulo, neste caso em mm, por ser a raiz quadrada da média dos erros (diferenças entre os valores estimados e os valores observados) quadráticos, como se observa na Equação 1.

$$\text{REMQ} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (V_{ie} - V_{io})^2 / N} \quad (1)$$

Em que:

REMQ é a Raiz do Erro Médio Quadrático;

V_{ie} é o valor estimado de i ;

V_{io} é o valor observado de i ;

N é quantidade de estações (16).

Para P e ETo , V_{ie} refere-se ao valor estimado pela interpolação de P ou ETo , exatamente no ponto que retirou-se a estação, enquanto que V_{io} é o valor real desta estação. Para o BHC, V_{ie} refere-se ao valor calculado do BHC a partir do valor estimado (" V_{ie} ") pela interpolação de P e ETo , no exato ponto no qual, retirou-se a estação, enquanto que V_{io} é o valor calculado de BHC com os valores reais (" V_{io} ") de P e ETo desta estação.

Nesta amostragem iterativa, realizou-se uma série de sorteios que foram projetados em gráfico contendo no eixo x o número de sorteios e no eixo y , a média acumulada da REMQ gerada em cada sorteio (simulação). A ideia central do método é que em uma série longa de sorteios, a média acumulada da REMQ apresente a tendência à estabilizar.

Para identificar o número de sorteios necessários, os seguintes passos foram efetuados:

6.3.3 Análise da suficiência amostral

Para as avaliações de P e ETo , os 3 meses do ano que possuem maior variância entre eles, foram analisados pra nortear o número de sorteios. A variância foi calculada conforme a Equação 2:

$$\text{var}(X) = E((X - \mu)^2) \quad (2)$$

onde:

$\text{var}(X)$ é a variância da variável aleatória X

μ é a média da variável aleatória X ;

E representa o valor esperado, também chamado como esperança matemática.

Em outras palavras, variância é o valor esperado do quadrado do desvio de X da sua própria média.

Para P foram analisados os meses de maio, setembro e novembro, pois possuem maior variância, enquanto que para ETo os meses de junho, julho e agosto apresentaram maior variância.

Procurando minimizar a quantidade de simulações, em vez de se fazer interpolações com todas as quantidades de estações a serem analisadas, o que seria dentro do âmbito de 15 estações até o mínimo de 3 estações, apenas analisou-se as interpolações com 3, 7 e 11 estações, possibilitando, da mesma forma, selecionar o número de sorteios.

Foram realizados 300 sorteios para verificar o comportamento da curva e identificar o número de sorteio a ser utilizado para a variável P interpolada por 3 estações. Para interpolação com 7 estações, 200 sorteios foram realizados enquanto que para 11 estações, foram 100 sorteios. Já para a variável ETo foram realizados 100 sorteios para todos.

Para indicar a suficiência amostral do BHC, todos os meses precisaram ser considerados pelo fato de que, para o cálculo deste BHC, a situação do armazenamento do solo depende do mês anterior.

Sendo assim, procurou-se minimizar a quantidade de simulações analisando as interpolações apenas com 3 estações, haja vista que para P e ETo, esta quantidade de estações requer maior número de sorteios, o que é de se esperar considerando que por apresentar o menor número de estações, os maiores erros sejam encontrados nessa simulação.

Após identificar o número de sorteios necessários para P, ETo e BHC, uma análise da REMQ gerada por estas quantidades de simulações foi realizada para as todas as diferentes quantidades de estações.

6.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando o objetivo do trabalho que é investigar a influência da densidade de informações na espacialização de P, ETo e BHC, verifica-se que, confrontando a Tabela 4 com a Tabela 3, a rede utilizada neste trabalho (ARPAV, 2014) apresenta boa densidade de informação conforme as recomendações da OMM (WMO, 2008). Mesmo nas simulações que utilizaram 3 estações para P, os valores foram próximos às recomendações da OMM, sendo 5.666,7 km² por estação, o que ainda é levemente superior ao recomendado para P.

Nas simulações com 3 estações de ETo, chegou-se à densidade de 5.666,7 km² por estação, o que aparentemente indicaria que esta densidade está aquém às recomendações da

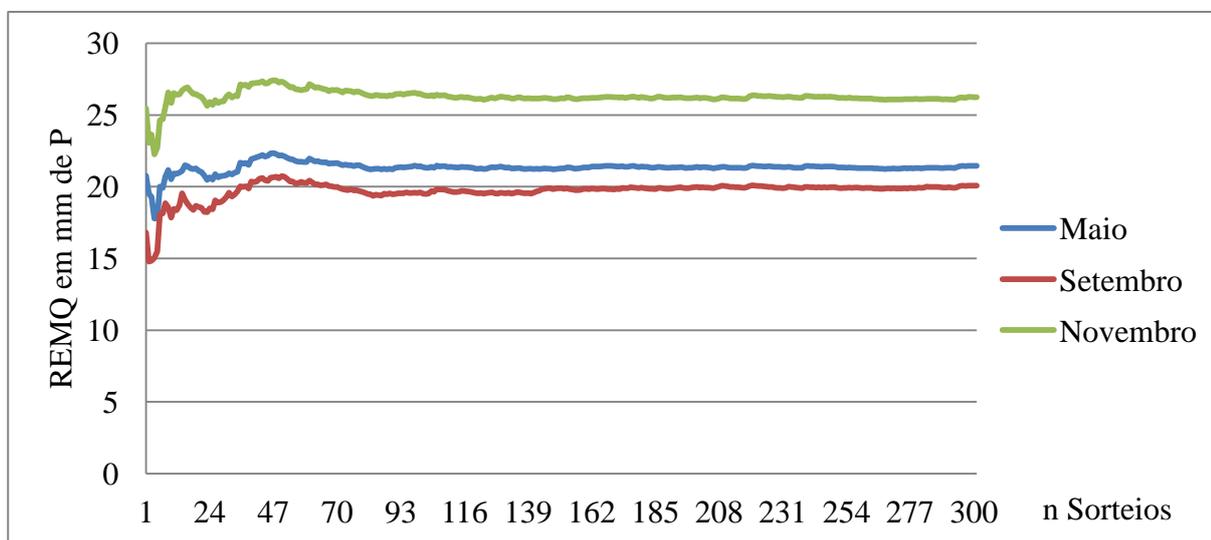
OMM em 666,7 km² por estação, se considerado apenas a recomendação para planícies interioranas. Porém, conforme a Figura 3, toda a parte leste da área de estudo está em área litorânea e, além do mais, possui uma parte de mar, a qual pode ser desconsiderada neste cálculo de densidade. Portanto, mesmo nas simulações de 3 estações para a variável ETo, foram obedecidas as recomendações da OMM.

Portanto, é esta riqueza de informação que vai permitir quantificar as incertezas nas espacializações de P, ETo e BHC referentes à densidade da rede desta região, segundo os critérios da OMM.

6.4.1 Análise da suficiência amostral

Os gráficos da Figura 8 apresentam as curvas geradas com 3 estações utilizadas na interpolação de P para os meses de maio, setembro e novembro, respectivamente, com 300 sorteios.

Figura 8 - Comportamento da curva da Raiz do Erro Médio Quadrático (REM_Q) para 3 estações de precipitação (P), para os meses de maio, setembro e novembro, com 300 sorteios.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com as curvas dos gráfico da Figura 8, o ponto a partir de onde a REM_Q se torna aproximadamente constante refere-se a 70 sorteios, em todos os gráficos referentes a 3 estações utilizadas na interpolação de P.

Esta mesma metodologia foi seguida para 7 e 11 estações de P, bem como para 3, 7 e 11 estações de ETo e 3 estações de BHC.

Resumidamente, a Tabela 4 apresenta os resultados da análise da quantidade de sorteios necessários para P, ETo e BHC.

Tabela 4 - Quantidade de sorteios necessários para P, ETo e BHC.

Quantidade de Sorteios							
Nº Estações	P			ETo			BHC
Meses:	Mai	Setembro	Novembro	Junho	Julho	Agosto	Todos
3	70	70	70	12	12	12	50
7	20	40	60	7	7	7	-
11	40	70	70	7	7	7	-

Fonte: Próprio autor.

Considerando que o número maior de sorteios apontado pelos gráficos foi de 70, optou-se por generalizar para todas as quantidades de estações e todos os meses o valor de 70 sorteios para a variável P. Desta mesma forma, considerando que o número maior de sorteios para ETo foi de 12 com a utilização de 3 estações, optou-se por generalizar para todas as quantidades de estações e todos os meses o valor de 12 sorteios para a variável ETo. Para BHC, 50 sorteios foram a suficiência amostral encontrada.

6.4.2 Análise das simulações

Para a variável P, foram feitos 70 sorteios, conforme indicado na suficiência amostral, para cada mês e para cada quantidade de estações usadas na interpolação de P, sendo estas 3, 5, 7, 9, 11 e 13 estações, conforme explicado na Tabela 5, que contém a saída dos resultados das simulações. Para 15 estações, a análise combinatória neste caso foi realizada, haja vista que bastava eliminar uma das 16 estações por vez e calcular a REMQ gerada.

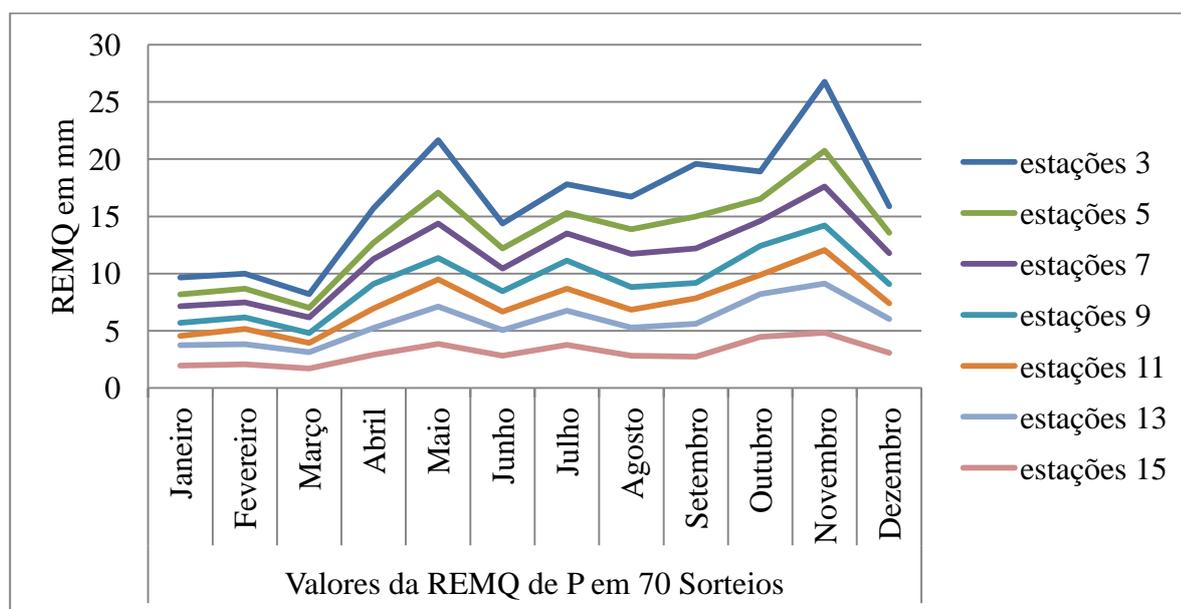
Os gráficos encontrados na Figura 9 auxiliam na interpretação do comportamento da REMQ em cada um dos meses conforme varia o número de estações usados na interpolação de P.

Tabela 5 - Valores da Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) para P resultantes dos 70 sorteios.

Valores da REMQ (mm) em 70 Sorteios												
Nº Estações	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
3	9,7	10,0	8,2	15,7	21,7	14,4	17,8	16,7	19,6	18,9	26,8	15,9
5	8,2	8,7	7,0	12,7	17,1	12,2	15,3	13,9	15,0	16,5	20,7	13,6
7	7,2	7,5	6,2	11,3	14,4	10,5	13,5	11,7	12,2	14,6	17,6	11,8
9	5,7	6,2	4,8	9,1	11,4	8,5	11,1	8,8	9,2	12,4	14,2	9,1
11	4,6	5,2	3,9	7,0	9,5	6,7	8,7	6,8	7,8	9,9	12,1	7,4
13	3,8	3,8	3,1	5,2	7,1	5,0	6,8	5,3	5,6	8,2	9,1	6,0
15	2,0	2,1	1,7	2,9	3,9	2,8	3,8	2,8	2,7	4,5	4,8	3,1

Fonte: Próprio autor.

Figura 9 - Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) de precipitação (P) em 70 sorteios, ao longo do ano.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 9, nota-se que com a redução do número de estações na interpolação, não só a REMQ aumenta, mas também as amplitudes destes erros, como se vê comparando a curva referente a 3 estações, que possui maior comportamento ondular do que a curva referente a 15. É um aumento evidentemente gradual.

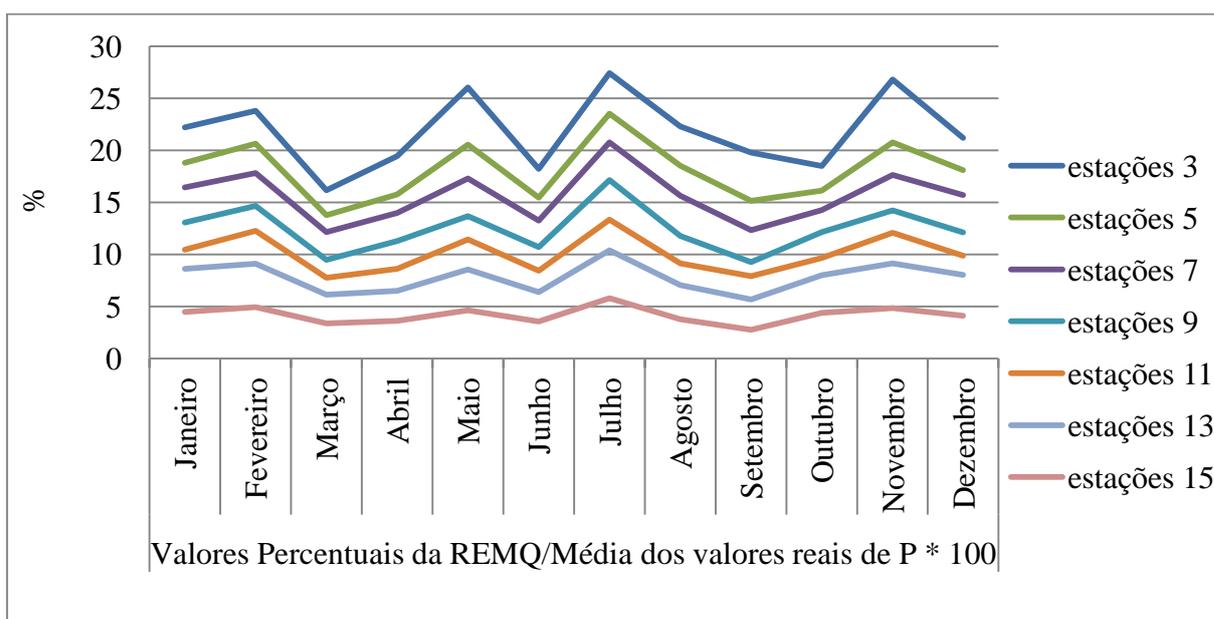
Nota-se que os picos da REMQ para 3 estações foram justamente nos meses de grande variância, maio, setembro e novembro, demonstrando a sensibilidade desses meses à interpolação de P, apontando ser a variabilidade, característica das precipitações, um indicador de grandes incertezas.

Tal afirmação também pode ser observada quando se compara o mês de março ao mês de novembro (um dos meses de maior variância) no gráfico da Figura . Em março, com 3 estações, tem-se uma REMQ de 8,2 mm que é um erro inferior ao encontrado em novembro para 13 estações, que foi de 9,1 mm, evidenciando que, devido à alta variabilidade dos valores de P em novembro, mesmo em uma situação tida como mais favorável à interpolação desses valores, por utilizarem 13 estações contra 3 estações em março, foram gerados maiores erros.

Analisando a Figura fica evidente o aumento do erro conforme diminuem-se as quantidades de estações utilizadas na interpolação de P, e vice-versa, indicando também que as incertezas aumentam quando a densidade de informação diminui.

Considerando que a REMQ transforma valores negativos em positivos, auxiliando na comparação geral dos erros médios gerados pelo modelo, não se pode afirmar se existe subestimação ou superestimação na utilização de mais ou menos estações na interpolação de P, mas pode-se compreender, de forma geral e aproximada, a que percentuais tais erros correspondem em referência à média dos valores reais de P. A Figura 10 e a Tabela 6 apresentam os valores percentuais da comparação entre as REMQ geradas com as diferentes quantidades de estações utilizadas na interpolação, com os valores das médias geradas pelos valores reais de P.

Figura 10 - Valores percentuais da Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) em referência à média dos valores reais de precipitação (P).



Fonte: Próprio autor.

Os resultados demonstraram, conforme observa-se na Figura 10 e na Tabela 6, que na omissão de apenas uma estação, o percentual da REMQ em relação à média dos valores reais de P já oscila em valores de 5%, enquanto que com a diminuição gradual do número de estações, estes valores percentuais aumentam, chegando a ultrapassar a marca de 25% quando se utiliza apenas 3 estações na interpolação de P.

Tabela 6 - Valores percentuais da Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) em referência à Média dos valores reais de precipitação (P).

Valores Percentuais da REMQ/Média de P *100												
Nº Estações	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
3	22,2	23,8	16,2	19,5	26,1	18,2	27,4	22,3	19,8	18,5	26,8	21,2
5	18,8	20,6	13,8	15,8	20,6	15,5	23,5	18,5	15,1	16,1	20,8	18,1
7	16,4	17,8	12,2	14,0	17,3	13,2	20,8	15,6	12,3	14,3	17,6	15,7
9	13,1	14,7	9,5	11,3	13,7	10,7	17,2	11,8	9,3	12,1	14,2	12,1
11	10,5	12,3	7,7	8,6	11,4	8,4	13,4	9,1	7,9	9,7	12,1	9,9
13	8,6	9,1	6,1	6,5	8,6	6,4	10,4	7,0	5,7	8,0	9,1	8,0
15	4,5	4,9	3,4	3,6	4,6	3,6	5,8	3,8	2,8	4,4	4,8	4,1

Fonte: Próprio autor.

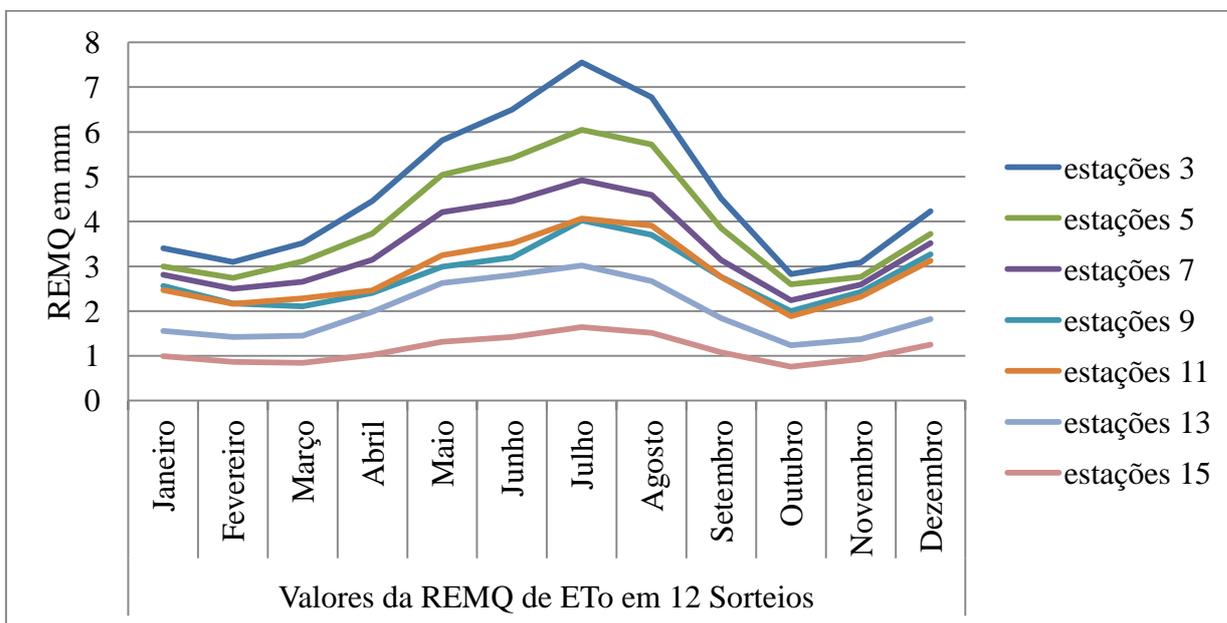
Considerando o mês de julho, que apresentou um percentual de 27,4 e que a média de P para este mês foi de 65 mm, tal percentual poderia representar 17,81 mm na média mensal. Já em novembro, que é um mês chuvoso, com P médio de 112,86 mm, 26,8 % representariam 30,25 mm.

Para a variável ETo, fez-se os 12 sorteios indicados pela suficiência amostral, para cada mês e para cada quantidade de estações usadas na interpolação, sendo estas 3, 5, 7, 9, 11 e 13 estações, semelhante à Tabela 5. Para 15 estações, a análise combinatória foi realizada, como também foi feita para P.

As curvas do gráfico da Figura 11 auxiliam na interpretação do comportamento da REMQ em cada um dos meses conforme o número de estações usados na interpolação de ETo muda.

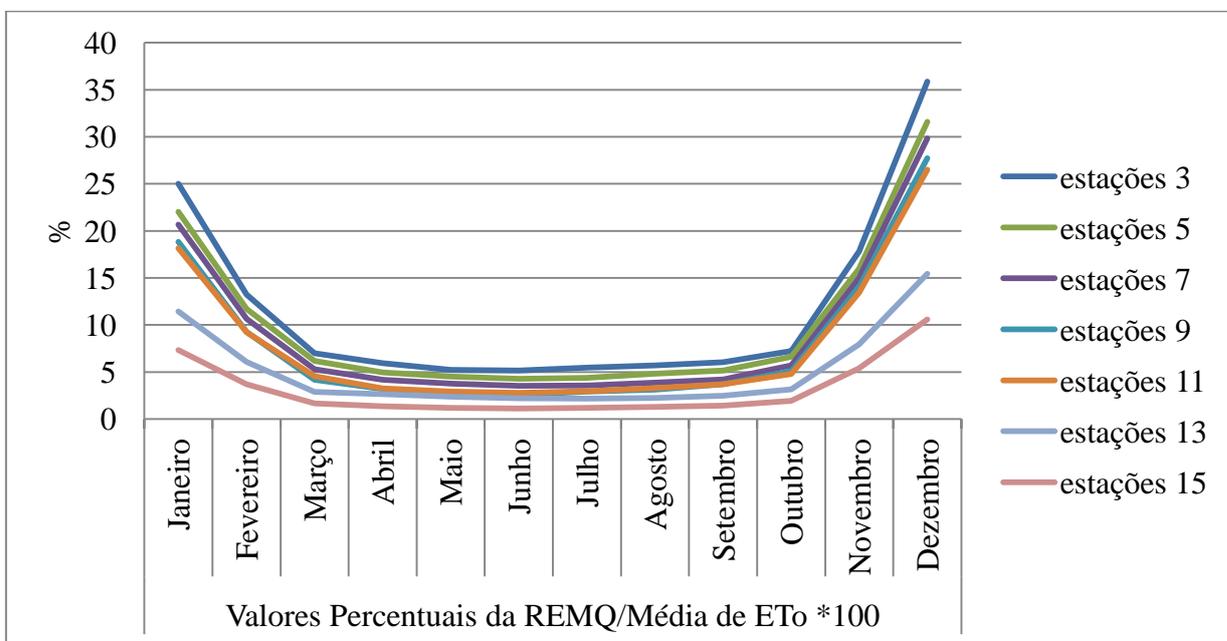
A Figura 17 apresenta os valores percentuais da comparação entre as REMQ geradas com as diferentes quantidades de estações utilizadas na interpolação, com os valores das médias geradas pelos valores reais de ETo.

Figura 11 - Raiz do Erro Médio Quadrático (REM_Q) de evapotranspiração de referência (E_{T0}) em 12 sorteios, ao longo do ano.



Fonte: Próprio autor.

Figura 17 - Valores percentuais da Raiz do Erro Médio Quadrático (REM_Q) de evapotranspiração (E_{T0}) em referência à média dos valores reais de E_{T0}.



Fonte: Próprio autor.

Verifica-se na Figura 17 que nos meses de março a outubro, as REMQ apresentaram os valores mais baixos e variaram menos com a mudança na quantidade de estações quando comparados janeiro, fevereiro, novembro e dezembro.

Avaliando a omissão de uma estação, ou seja, usando 15 estações, para estes meses mais quentes, o percentual da REMQ em relação à média dos valores reais de ETo oscila em valores de 1,5%, enquanto que com a diminuição gradual do número de estações, estes valores aumentam, chegando a 7,2% quando se utiliza apenas 3 estações na interpolação de ETo.

Já nos meses mais frios, a omissão de uma estação se torna mais significativa no resultado, gerando valores percentuais de 10,6%, no mês de dezembro. Ao diminuir o número de estações a 3, este valor sobe para 35,9%, o maior valor encontrado. Considerando a média de ETo para este mês foi de 11,8 mm, tal percentual poderia representar 4,2 mm na média mensal.

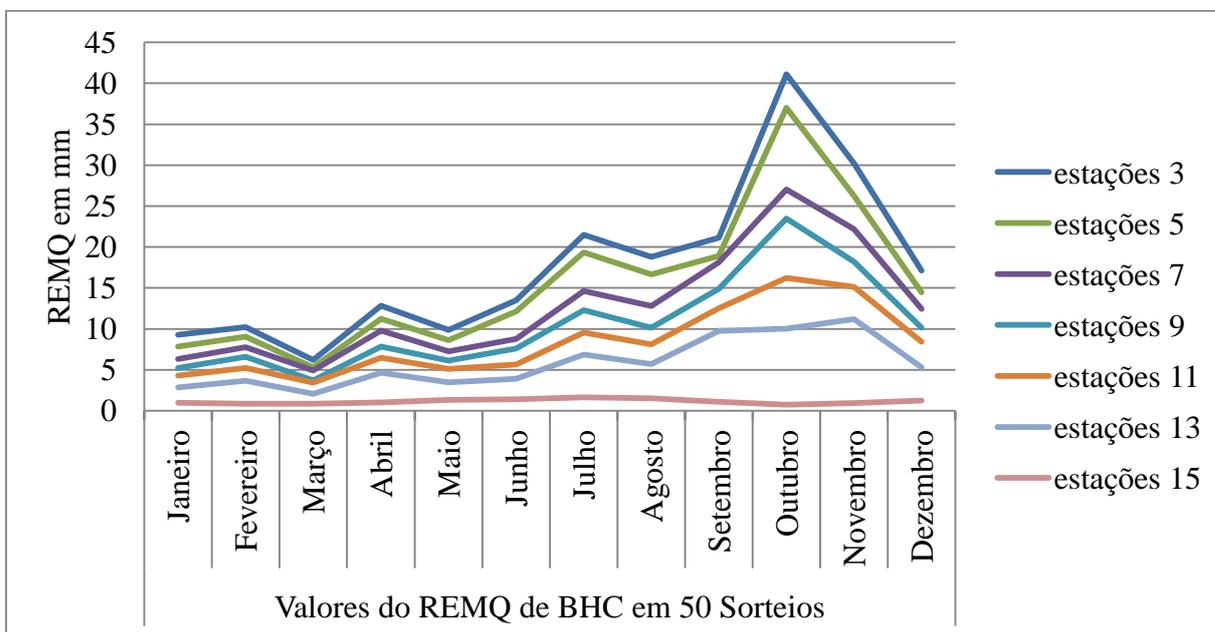
Verificando que nos meses mais quentes, a variação da REMQ de ETo foi menor, pode-se afirmar que, na espacialização de ETo nestes meses, as incertezas são menores e a densidade de informação é menos impactante, dando maior confiabilidade para a representação espacial da ETo nos meses quentes, o que pode ser relevante, haja vista a importância de se conhecer tal variável nos meses mais quentes devido à demanda hídrica.

Para compreender a influência das diferentes quantidades de estações no BHC, fez-se então os 50 sorteios indicados pela suficiência amostral para cada mês e para cada quantidade de estações usadas na interpolação de P e ETo e conseqüente cálculo de BHC, sendo estas 3, 5, 7, 9, 11 e 13 estações, semelhantemente à Tabela 5. Para 15 estações, a análise combinatória foi realizada, como também foi feita para P e ETo.

Os gráficos da Figura auxiliam na interpretação do comportamento da REMQ em cada um dos meses, conforme o número de estações usados na interpolação para o cálculo de BHC muda.

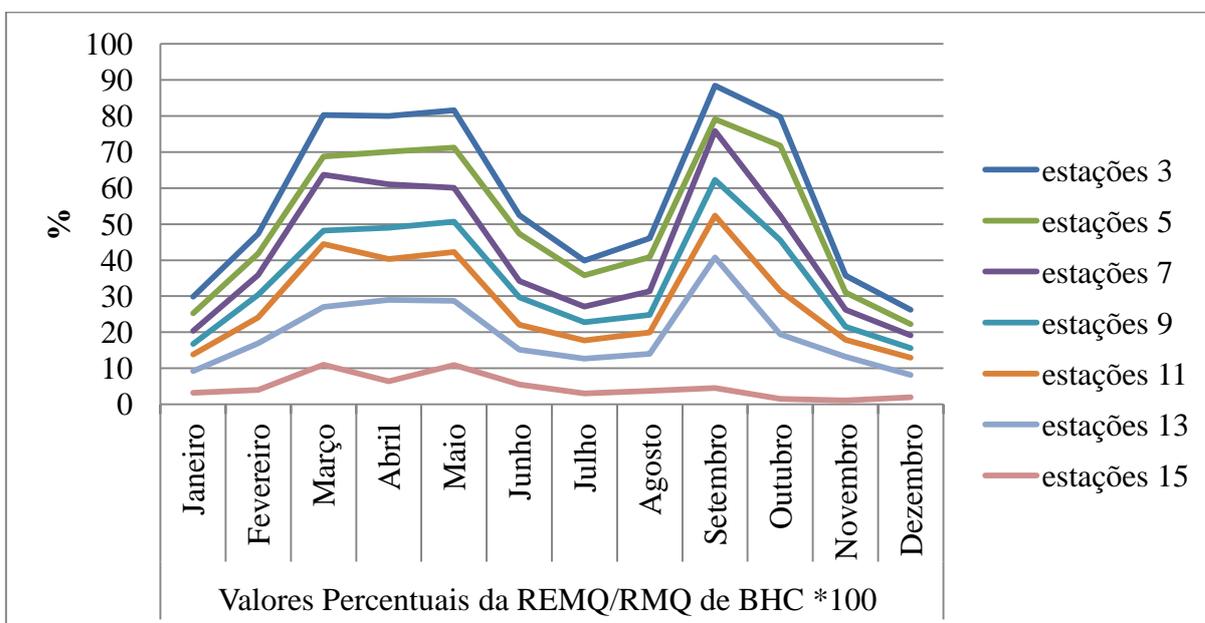
A Figura 14 apresenta os valores percentuais da comparação entre as REMQ geradas com as diferentes quantidades de estações utilizadas na interpolação, com os valores da raiz da média dos quadrados (RMQ) dos valores de BHC. Tal procedimento se torna necessário pelo fato de que os valores de BHC, diferentemente de P e ETo, variam de valores negativos a valores positivos. Uma comparação com a média simples de tais valores poderia mascarar a comparação final com a REMQ, pois os valores positivos de BHC poderiam anular valores negativos.

Figura 13 - Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) de balanço (BHC) em 50 sorteios, ao longo do ano.



Fonte: Próprio autor.

Figura 14 - Gráfico dos valores percentuais da Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) em referência a raiz da média dos quadrados (RMQ) dos valores de BHC.



Fonte: Próprio autor.

Os maiores percentuais referem-se aos meses de março, abril, maio, setembro e outubro. Nestes meses, o percentual da REMQ ficou em torno de 80% quando usados apenas

3 estações para o cálculo de BHC, enquanto que com a utilização de 15 estações, apenas os meses março e maio apresentaram percentuais de 11% e 10,9% respectivamente, sendo que nos restantes dos meses, esse percentual ficou no máximo em 6,3% para o mês de abril, 5,5% para o mês de junho e menos de 5% para o restante dos meses.

No mês de setembro, essa variação representa um salto de 4,5% com 15 estações para 88,4% com 3 estações, demonstrando grande sensibilidade do modelo à quantidade de estações utilizadas para o cálculo de BHC, principalmente nos meses em que o modelo prevê mudanças no armazenamento de água no solo.

Isso pode ser confirmado na Figura 6 verificando que os meses de março e abril são os meses em que BHC começa a ficar negativo, caracterizando uma saída excessiva de água do armazenador (solo), não repostada pela P. Já os meses de setembro e outubro representam os meses em que o armazenador começa a receber recargas significativas e proporcionar BHC positivos.

Considerando que o BHC apresenta maior sensibilidade à densidade de estações nos meses em que o armazenamento de água no solo sofre as maiores influências de entrada ou saída de água, pode-se afirmar que o BHC apresenta as maiores incertezas nas épocas mais delicadas do ano, ou seja, começo de épocas de estiagem ou de precipitações, sendo esses os meses mais impactados pela densidade de informação, podendo a ausência de estações, diminuir a percepção de déficit do modelo nesses meses, como pode ser verificado na Figura , que apresenta os maiores valores de REMQ exatamente para esses meses, março, abril, maio, setembro e outubro.

Vale ressaltar que os meses em que a REMQ aumenta relativamente mais em comparação aos outros meses, com a diminuição de estações, pode demonstrar uma maior sensibilidade desses meses frente à mudanças climáticas, o que orientaria tomadores de decisão sobre o uso do solo nestes meses.

6.5 CONCLUSÃO

A alta variabilidade da precipitação carrega incertezas na sua espacialização. Foram os meses de maiores variâncias que apresentaram os picos da Raiz do Erro Médio Quadrático para a densidade mais baixa de informação (3 estações), demonstrando a sensibilidade desses meses à interpolação de precipitação.

Considerando todas as simulações de densidade de estações, a variação da Raiz do Erro Médio Quadrático da evapotranspiração potencial de referência (ET_o) foi menor nos

meses quentes e, portanto, conclui-se que a espacialização da ETo nestes meses recebe menos impacto advindo da densidade de estações, proporcionando uma representação espacial com menos incertezas para os meses mais quentes.

Junto a isso, também pode-se concluir que a espacialização de ETo nos meses mais frios da região de Vêneto sofre maior influência da quantidade de estações na interpolação.

Conclui-se que o Balanço Hídrico Climatológico (BHC) apresenta maior sensibilidade à densidade de estações nos meses em que o armazenamento de água no solo sofre as maiores influências de entrada ou saída de água e portanto a representação espacial do BHC possui maiores incertezas no começo de épocas de estiagem ou de precipitações.

Também pode-se concluir que a ausência de estações pode diminuir a percepção de déficit pelo modelo do BHC nesses meses que sofreram maior impacto da redução de densidade de estações, justamente por estarem ligeiramente nos limites superiores de déficit e inferiores de excesso hídrico no BHC.

As incertezas estimadas, em referência a melhor situação (16 estações), para a redução de estações de 15 para 3, variaram de 3 a 27% para precipitação, de 1 a 36% para ETo e de 1 a 88% para o BHC. Portanto, houve aumento do erro na espacialização das variáveis trabalhadas, conforme foram diminuídas as quantidades de estações utilizadas na interpolação, ou seja, as incertezas nas espacializações de P, ETo e BHC aumentam quando a densidade de informação diminui, e vice-versa.

A análise de incerteza realizada neste trabalho conseguiu demonstrar quais meses podem carregar maiores incertezas em suas espacializações, tanto para P, ETo e o BHC para a área de estudo.

Considerando as densidades recomendadas pela OMM (WMO, 2008), esta análise de incertezas indica, para essa região, que as mesmas não são suficientes para boas avaliações do BHC. Isso pode indicar que ainda maiores incertezas podem ocorrer em regiões com densidade de informação inferior às analisadas neste trabalho e que foram semelhantes às recomendações mínimas da OMM.

REFERÊNCIAS

AGENZIA REGIONALE PER LA PREVENZIONE E PROTEZIONE AMBIENTALE DEL VENETO - ARPAV. **Dati Ambientali**. 2014. Disponível em: <<http://www.arpa.veneto.it/arpav>>. Acesso em: setembro/2014

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. **Food And Agriculture Organization Of The United States - FAO**. Rome, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e06.htm>>. Acesso em: 2014.

ALVES, E. D. L.; VECCHIA, F. A. S. Análise de diferentes métodos de interpolação para a precipitação pluvial no Estado de Goiás-doi: 10.4025/actascihumansoc. v33i2. 13815. **Acta Scientiarum. Human and Social Sciences**. v. 33, n. 2, p. 193-197, 2011. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciHumanSocSci/article/viewFile/13815/pdf>>. Acesso em: julho, 2016.

ALVES, V. L. P.; CARNIEL, A. Q.; COSTALLAT, L. T. L.; TURATO, E. R. Significados do adoecer para pacientes com lúpus eritematoso sistêmico: revisão da literatura. **Rev. Bras. Reumatol**. 2015. 55(6):522-527. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbr/v55n6/0482-5004-rbr-55-06-0522.pdf>>. Acesso em: junho, 2016.

AZIZ, M. K. B. M.; YUSOF, F.; DAUD, Z. M.; YUSOP, Z.; AFIF, M. Optimal design of rain gauge network in Johor by using geostatistics and particle swarm optimization. **International Journal of Geomate**. v. 11, n. 25, p. 2422-2428. 2016. Disponível em: <<http://www.geomatejournal.com/sites/default/files/articles/2422-2428-5137-Khairul-Sept-2016.pdf>>. Acesso em: julho, 2016.

BALES, J. D.; COSTA, J. E.; HOLTSCHLAG, D. J.; LANFEAR, K.J.; LIPSCOMB, S.; MILLY, P.C.D.; VIGER, R.; WOLOCK, D.M. **Design of a National Streamflow Information Program. Report with Recommendations of a Committee**. Reston, Va., U.S. Geological Survey, Open File Report 2004 -1263, 42p. 2004. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/of/2004/1263/pdf/OFR_2004-1263.pdf> Acesso em: julho 20016.

BECHINI, L.; DUCCO, G.; DONATELLI, M.; STEIN, A. Modelling, interpolation and stochastic simulation in space and time of global solar radiation. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.81, p.29-42, 2000. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.384.906&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: maio/2016.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Hidroweb**. Sistema de informações hidrológicas. 2013. Disponível em: < <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/> >. Acesso em: julho, 2016.

CECÍLIO, R.A.; SILVA, K.R. da; XAVIER, A.C.; PEZZOPANE, J.R.M. Métodos para a espacialização dos elementos do balanço hídrico climatológico. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.47, n.4, p.478-488, abr. 2012. Disponível em: <<http://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/10202/6859>>. Acesso em: Abril/2016.

CHIAUDANI, A. **Agroclimatologia statica e dinamica del veneto analisi del periodo 1956-2004**. 2008. 161p. Tese (Doutorado Ciências das Produções Vegetais) - Università degli Studi di Padova, Pádua, Vêneto, Itália, 2008. Disponível em: <http://paduaresearch.cab.unipd.it/532/1/tesi_Chiaudani_finale.pdf>. Acesso em: maio/2016.

CHICO, A. S. M.; DZIEDZIC, M. Princípios e Critérios de Concepção de Rede Integrada de Monitoramento de Recursos Hídricos: Caso da República de Angola. **RBRH**. vol. 20 n.3 Porto Alegre. jul./set. 2015. p. 615 - 628. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/17171d8093d58908ebd911230e05b69e_0e5d149204f419a68274a576d2ff90c3.pdf>. Acesso em: junho, 2016.

CHVATAL, V. L. S.; BÖTTCHER-LUIZ, F.; TURATO, E. R. Respostas ao adoecimento: mecanismos de defesa utilizados por mulheres com síndrome de Turner e variantes. **Rev Psiquiatria Clínica**. 2009. 36(2):43-7. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-60832009000200001>. Acesso em: junho, 2016.

CONSENSA, C. B. **Precipitação pluviométrica e interna em povoados de *Eucalyptus* spp. em Rosário do Sul, RS**. 2012. 95p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2012. Disponível em: <http://cascavel.cpd.ufsm.br/tede/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=5155>. Acesso em: julho, 2016.

COSTA, F. F. DA; OLIVEIRA, G. D. DE; CAIXETA, P. R. C.; SANTOS; G. R. dos. Espacialização de precipitação máxima média com interpolador geoestatístico: krigagem. In: IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. **Anais...** Recife - PE, 06-09, Maio, 2012. p. 001 - 008. Disponível em: <https://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIV/CD/artigos/SIG/134_5.pdf>. Acesso em: julho, 2016.

D'ANGIOLELLA, G. VASCONCELLOS, V.L.D.; ROSA, J.W.C. Estimativa e espacialização do balanço hídrico na mesorregião sul da Bahia. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...** Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 83-90. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/10.07.17.21/doc/83.pdf>>. Acesso em: 2014.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências**. São Paulo: Pioneira Thompson Learning, 2006.

EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. Improvements on cross-validation: the 632+ bootstrap method. **Journal of the American Statistical Association**, v. 92, n. 438, p. 548-560, 1997. Disponível em: <http://www.stat.washington.edu/courses/stat527/s13/readings/EfronTibshirani_JASA_1997.pdf>. Acesso em: julho, 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. Embrapa Solos. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.jc.iffarroupilha.edu.br/site/midias/arquivos/2012101910232134sistema_brasileiro_de_classificacao_dos_solos.pdf>. Acesso em: julho, 2016.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE - ESRI. **ArcGIS**. Sistema de Informação Geográfica para área de trabalho de computador, versão 10.2. 2014a. Disponível em: <<https://www.arcgis.com>>. Acesso em: agosto 2014.

_____. **ArcGIS Resource Center**. 2014b. Disponível em: <<http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/003000000000z0000000>>; <<http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/003100000059000000>>. Acesso em: agosto/2014.

FONTANELLA, B. J. B.; LUCHESI, B. M.; SAIDEL, M. G. B.; RICAS, J.; TURATO, E. R.; MELO, D. G. Amostragem em pesquisas qualitativas: proposta de procedimentos para constatar saturação teórica. **Caderno de Saúde Pública**, Rio de Janeiro. v. 27, p. 389-394, 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/csp/v27n2/20.pdf>>. Acesso em: julho, 2016.

FONTANELLA, B. J. B.; MAGDALENO JÚNIOR, R. Saturação teórica em pesquisas qualitativas: Contribuições psicanalíticas. **Psicologia em Estudo**, Maringá, v. 17, n. 1, p. 63-71, jan./mar. 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-73722012000100008>. Acesso em: junho, 2016.

FONTANELLA, B. J. B.; RICAS, J.; TURATO, E. R. Amostragem por saturação em pesquisas qualitativas em saúde: contribuições teóricas **Caderno de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, 24(1):17-27, jan, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-311X2008000100003>. Acesso em: junho, 2016.

FRANCIS, J. J.; JOHNSTON, M.; ROBERTSON, C.; GLIDEWELL, L.; ENTWISTLE, V.; ECCLES, M. P.; GRIMSHAW, J. M. What is an adequate sample size? Operationalising data saturation for theory-based interview studies. **Psychology and Health**, v. 25, n. 10, p. 1229-1245, 2010. Disponível em: <<http://openaccess.city.ac.uk/1732/>>. Acesso em: junho, 2016.

FRANCO, A. C. L.; UDA, P. K. Comparação de métodos de espacialização da precipitação na bacia do alto rio Negro, Santa Catarina. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa, PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, **Anais... INPE**, 2015. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0607.pdf>>. Acesso em: julho, 2016.

GAMA, J. R. V.; BOTELHO, S. A.; BENTES-GAMA, M. DE M.; SCOLFORO, J. R. S. Tamanho de parcela e suficiência amostral para estudo da regeneração natural em floresta de várzea na Amazônia. **Cerne**, v. 7, n. 2, p. 1-11, 2001. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/237039644_Tamanho_de_parcela_e_suficiencia_a_mostral_para_estudo_da_regeneracao_natural_em_floresta_de_varzea_na_amazonia>. Acesso em: julho, 2016.

JÚNIOR, H. D. DA S.; SOUZA, W. M. DE; LACERDA, F. Estudo sobre a qualidade da distribuição espacial da rede meteorológica convencional e automática de Pernambuco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis, SC. **Anais... cbmet.com** Disponível em: <<http://www.cbmet.com/cbm-files/14-08ee1c380b6b87efdce44b9a704e97ac.pdf>>. Acesso em: maio/2016.

KOHAVI, R. A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. In: **Ijcai**. 1995. p. 1137-1145. Disponível em: <<http://web.cs.iastate.edu/~jtian/cs573/Papers/Kohavi-IJCAI-95.pdf>>. Acesso em: julho, 2016.

KUHNEM JÚNIOR, P. R.; STUMPF, R.; SPOLTI, P.; DEL PONTE, E. M. Características patogênicas de isolados do complexo *Fusarium graminearum* e de *Fusarium verticillioides* em sementes e plântulas de milho. **Ciência Rural**, v.43, n.4, abr, 2013. p. 583-588. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cr/v43n4/a11113cr2012-0864.pdf>>. Acesso em: julho, 2016.

LADEIRA NETO, J. F. **Mapa de declividade em percentual do relevo brasileiro**. Rio de Janeiro: CPRM, 2013. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Geodiversidade/Mapa-de-Declividade-em-Percentual-do-Relevo-Brasileiro-3497.html>>. Acesso em: julho, 2016.

LIMA, M. S. C. S.; SOUZA, C. A. dos S.; PEDERASSI, J. Suficiência Amostral - aspectos conceituais para acadêmicos de graduação e o uso do software Excel para seu entendimento. **Rev. Cient. Cent. Univ. Barra Mansa**. UBM, Barra Mansa, v.13, n.26, p.28, dez. 2011. Disponível em: <http://www.academia.edu/7116163/Sufici%C3%Aancia_Amostral_-_aspectos_conceituais_para_acad%C3%Aamicos_de_gradua%C3%A7%C3%A3o_e_o_uso_do_software_Excel_para_seu_entendimento>. Acesso em: maio, 2016.

LOUCKS, D. P.; VAN BEEK, E. **WaterResources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications**. Paris. UNESCO Publishing – studies and reports in hydrology. 2005. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001434/143430e.pdf>>. Acesso em junho, 2016.

MARCUZZO, F. F. N.; MELATI, M. D. Cálculo de densidade pelos critérios da OMM e espacialização de novas estações P e Pr na sub-bacia 85. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., 2015, Brasília, DF. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2015. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/15061/PAP018953.pdf?sequence=1>>. Acesso em: maio/2016.

MELATI, M. D.; MARCUZZO, F. F. N. Espacialização da recomendação de novas estações pluviométricas na sub-bacia 87 segundo os critérios de densidade da Organização Mundial de Meteorologia. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., (SBSR), 2015, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015. 1 DVD. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0010.pdf>>. Acesso em: maio 2016.

MISHRA, A. K; COULIBALY, P. Developments in Hydrometric Network Design: a Review. **Reviews of Geophysics**, v.47, n. 2, RG2001. 2009. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007RG000243/full>>. Acesso em: julho 2016.

MISSIO, A. L.; BAYER, F. M.; GATTO, D. A.; CADEMARTORI, P. H. G. de. Sampling sufficiency of the anatomical characteristics of Brazilian hardwood using the resampling method. **Acta Scientiarum**. Technology. Maringá, v. 36, n. 3, p. 413-420, Julho - Set., 2014. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/20335>>. Acesso em: junho, 2016.

PARDO-IGÚZQUIZA, E. Optimal selection of number and location of rainfall gauges for areal rainfall estimation using geostatistics and simulated annealing. **Journal of Hydrology**, v. 210, n. 1, p. 206-220, 1998. Disponível em: <<http://www.beg.utexas.edu/gcc/bookshelf/optimization%20of%20observation%20networks/Optimal%20selection%20of%20number%20and%20location%20of%20rainfall%20gauges%20for%20areal.pdf>>. Acesso em: junho, 2016.

PILLAR, V. D. Suficiência amostral. In: BICUDO, C. D. M.; BICUDO, D. D. C. **Amostragem em Limnologia**. São Carlos: Rima, 2004. p. 25-43. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Valerio_Pillar/publication/228868503_Suficiencia_amostrал/links/540059710cf2194bc29ac60e.pdf>. Acesso em: maio 2016.

PEREIRA, A.R. Simplificando o Balanço Hídrico de Thornthwaite-Mather. **Bragantia**, Campinas, v.64, n.2, p.311-313, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052005000200019>. Acesso em: 2010.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **Python Language Reference**. Versão 2.7. Disponível em: <<http://www.python.org>>. Acesso em: setembro, 2014.

RIOS GAONA, M. F., OVEREEM, A., LEIJNSE, H., UIJLENHOET, R. Measurement and interpolation uncertainties in rainfall maps from cellular communication networks. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 8, p. 3571-3584, 2015. Disponível em: <<http://edepot.wur.nl/364084>>. Acesso em: julho, 2016.

SCHILLING, A. C.; BATISTA, J. L. F. Curva de acumulação de espécies e suficiência amostral em florestas tropicais. **Revista Brasil. Bot.**, V.31, n.1, p.179-187, jan.-mar. 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbb/v31n1/a16v31n1.pdf>>. Acesso em: junho, 2016.

SCOLFORO, J. R.; OLIVEIRA, A. D. de; MELLO, J. M. de; SILVA, C. P. de C.; GUEDES, I. C. de L. Suficiência amostral para vegetação dos fragmentos amostrados. In: SCOLFORO, J. R.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, A. D.(Ed.). **Inventário Florestal de Minas Gerais: Cerrado - Florística, Estrutura, Diversidade, Similaridade, Distribuição Diamétrica e de Altura, Volumetria, Tendências de Crescimento e Áreas Aptas para Manejo Florestal**. Lavras: UFLA, 2008. cap. 4, p.171-188. Disponível em: <http://www.inventarioflorestal.mg.gov.br/publicacoes/cerrado/capitulo_04.pdf>. Acesso em: junho, 2016.

SENI, G.; ELDER, J. F. Ensemble methods in data mining: improving accuracy through combining predictions. **Synthesis Lectures on Data Mining and Knowledge Discovery**. v. 2, n. 1, p. 1-126, 2010. Disponível em: <https://wiki.eecs.yorku.ca/course_archive/2014-15/F/4412/_media/ensemble_data_mining.pdf>. Acesso em: junho, 2016.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (Publications in Climatology, vol. VIII, n.1).

TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L. F. S. Evaporação e evapotranspiração. In: TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4 ed., Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2009. 943 p.

VARMA, S.; SIMON, R. Bias in error estimation when using cross-validation for model selection. **BMC bioinformatics**, v. 7, n. 1, p. 1, 2006. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1397873/>>. Acesso em: julho, 2016.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION - WMO. **Calculation of monthly and annual 30-year standard normals**. Geneva, Switzerland, 1989. Technical document n. 341. Disponível em: <<http://ac.ciifen.org/omm-biblioteca/WCDMP/TD-341.pdf>>. Acesso em: julho, 2016.

_____. **Guide to Hydrological Practice: Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices**. WMO. Geneva, Switzerland n.168, v.2, p.306, 2009. Disponível em:< <http://www.whycos.org/hwrp/guide/>> Acesso em: julho, 2006.

_____. Methods of observation. In: **Guide to Hydrological Practices: hydrology from measurement to hydrological information**. 6. ed. Geneva, Switzerland, 2008. v. 1, cap. 2, p. 24-27. (WMO - n. 168). Disponível em: <http://www.whycos.org/chy/guide/168_Vol_I_en.pdf>. Acesso em: 8 jul. 2016.

7 DISCUSSÃO

A ferramenta utilizada para o cálculo do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) espacializado, em cada célula, de forma distribuída e automatizada, foi desenvolvida em linguagem PythonTM de programação (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2014), utilizando-se do *package* ArcPy[®], pode ser utilizada para todos os usos comuns e já consagrados do BHC, como discutido nos Capítulos 2 e 5. Assim, existe um grande potencial de uso da ferramenta como desenvolvida para esta tese, entre elas com apoio a diversas políticas públicas, como as apresentadas no Capítulo 2.

O emprego do BHC espacializado possui grande potencial de uso na geração de cenários. Embora o BHC tenha sido empregado nessa tese com o uso de uma Capacidade de Água Disponível (CAD) de referência de 100mm, esse valor pode ser modificado para representar diferentes valores de CAD e ser utilizado para balanços de culturas. Sendo assim, dada a automatização da ferramenta utilizada, se torna ágil a geração de cenários de cultivos.

Esses cenários podem ser feitos conforme todas as variáveis envolvidas no BHC. A precipitação e a evapotranspiração podem ser simuladas para representar mudanças de clima nestas variáveis e serem utilizadas pela ferramenta na geração de mapas que auxiliam na identificação das áreas que serão ou não afetadas pelas mudanças. Tal possibilidade traz dinamismo às análises e proporciona a geração de diversos cenários.

Um exemplo de cenarização, útil às políticas públicas, é a avaliação da situação climática de uma área de interesse, identificando a possibilidade local de oferecer as condições necessárias a determinados cultivos, identificando possíveis aptidões de uso do solo. O uso do BHC espacializado pode oferecer um diferencial para esta avaliação por apresentar ao tomador de decisão, um mapa distribuído das tendências climáticas locais com menos incertezas que os outros métodos avaliados no trabalho, ao considerar tanto a variabilidade de precipitação, como de evapotranspiração, por tipo de cultura e a variação dos tipos de solo na região de estudo.

Embora a aplicabilidade do modelo do BHC espacializado apresente um potencial de uso relevante, algumas incertezas foram identificadas e discutidas nesta tese. Uma delas, avaliada no Capítulo 5, faz referência aos métodos utilizados na espacialização deste modelo: o método Cálculo-Interpolação (CI) e método Interpolação-Cálculo (IC). Identificou-se que, para a espacialização do BHC, o método IC, que utiliza a interpolação das variáveis de entrada do modelo (precipitação e evapotranspiração) para depois calcular o BHC em cada

célula (BHC_{ic}) diminui pouco as incertezas na representação do BHC, pois não houve diferença estatística entre os métodos.

Porém as incertezas advindas do método IC utilizado para espacializar o BHC podem ser facilmente minimizadas pela observação das recomendações de escolher um bom método interpolador para as variáveis P e ETo, por validação cruzada, e depois realizando o cálculo do BHC, para cada célula.

Embora as análises tenham apontado que a redução de incertezas promovida pelo emprego do método IC na espacialização do BHC ao invés do método CI, sejam estatisticamente não significativas, tal método (IC) possibilita a espacialização do BHC conforme diferentes valores de CAD, o que não é viável com o método CI. Com isso, possibilita-se a geração de cenários para diferentes culturas e tipos de solo, gerando produtos (mapas) com maior dinamismo e detalhamento que pelo método CI, adequando-se a realidade de cada pixel.

Já as incertezas referentes à densidade de informação (Capítulo 6) utilizada na geração dos mapas de BHC são as mais preocupantes, pois como abordado no referido capítulo, quando se trabalha com séries longas de dados, como as normais climatológicas, aumentam as dificuldades em se possuir dados medidos para tanto tempo, ainda mais com boa representatividade espacial.

Nos dados utilizados nesta tese, por exemplo, como a metodologia adotada consistia em utilizar dados de órgão público que disponibilizasse dados meteorológicos, via internet, mesmo para a Itália, que apresentou uma densidade satisfatória, a representação tida como padrão de 30 anos de observação não foi alcançada, pois se priorizou uma densidade de estações que viabilizasse as análises adequadamente e representasse, nas simulações, as recomendações mínimas de densidade da Organização Mundial de Meteorologia - OMM (WMO, 2008).

Tanto a *Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto* (ARPAV, Itália) quanto o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, Brasil) são órgãos públicos e disponibilizam dados meteorológicos ao público, via internet. Selecionando as estações da ARPAV com dados disponíveis para as análises propostas pelo trabalho, as variáveis precipitação, umidade relativa, velocidade do vento e temperatura representaram aproximadamente 20 anos de observações, totalizando 16 estações.

Procurando enriquecer esta discussão sobre as densidades de estação e seus impactos nas incertezas do BHC espacializado, uma seleção de estações também foi feita entre as estações do INMET no Rio Grande do Sul (RS), Brasil, para que a comparação referente às

concentrações de estações fosse mantida equiparável, resultando assim na seleção de 18 estações que atendiam às mesmas condições das 16 estações da ARPAV, no ano de 2014.

Com esses números de estações com dados disponíveis chegou-se à concentração em Vêneto de $17.000 \text{ km}^2 / 16 \text{ estações} = 1.062,5 \text{ km}^2$ para cada estação e de $281.748 \text{ km}^2 / 18 \text{ estações} = 15.652,7 \text{ km}^2$ para cada estação no RS, o que pode ser verificado na Tabela 5.

Nessa comparação, o RS apresenta $15.652,7 \text{ km}^2$ para cada estação meteorológica com dados, enquanto que a simulação com 3 estações de Vêneto feita neste trabalho (Capítulo 6) representa $5.666,7 \text{ km}^2$ para cada estação, ficando impossibilitado a geração de mapas por interpolação com menos de 3 estações. De qualquer forma, se fossem utilizadas 2 estações, hipoteticamente, teríamos ainda 8.500 km^2 para cada estação em Vêneto. Para que na região plana de Vêneto se pudesse simular uma concentração de estações equivalentes a encontrada atualmente no RS, para os 20 anos de dados disponibilizados pelo INMET, apenas uma estação deveria ser considerada, tendo assim 17.000 km^2 por estação.

Tabela 5 - Diferentes situações de séries de dados utilizáveis para a espacialização do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) no Rio Grande do Sul (RS), suas respectivas densidades e possíveis ordens de grandeza do erro percentual na média mensal do BHC.

Tipo de estação	Situação das séries de dados	Fonte	Nº de estações	Área (km²)	Densidade (km²/estação)	Possível ordem de grandeza do erro percentual na média mensal do BHC
Climatológica automática: Precipitação e dados para cálculo da evapotranspiração	Séries longas, dados utilizados na pesquisa	ARPAV - Vêneto	16	17.000	1.062,5	Considerado como a referência
Climatológica automática: Precipitação e dados para cálculo da evapotranspiração	Séries longas, equivalente à utilizada na pesquisa	INMET - RS	18	28.1748	15.652,7	de no mínimo 26% a mais de 88%
Climatológica automática: Precipitação e dados para cálculo da evapotranspiração	Algumas com séries curtas ainda	INMET - RS	39	28.1748	7.224, 3	de no mínimo 26% a mais de 88%
Pluviométrica: Precipitação	Séries longas já disponíveis	ANA - RS	140	28.1748	2.012,5	de 16 a 69 %
Pluviométrica: Precipitação	Algumas com séries curtas ainda	ANA - RS	206	28.1748	1.367,7	de 8 a 46 %

Fonte: Próprio autor.

Dentro dos limites do RS, existem atualmente 39 estações automáticas, ou seja, o dobro das estações que já possuem 20 anos de dados. Isso permite fazer uma projeção, considerando que estas continuarão em funcionamento, de $281.748 \text{ km}^2 / 39 \text{ estações} = 7.224, 3 \text{ km}^2$ para cada estação, como verificado na Tabela 5. Este aumento na densidade de informação acrescentará qualidade na informação utilizada no estado, em especial com os dados meteorológicos necessários para os cálculos da evapotranspiração, que por sua vez, apresenta menor variabilidade espacial do que a precipitação, como observado no Capítulo 6.

Porém, vale ressaltar que, como também observado no Capítulo 6, a precipitação demonstrou ser uma fonte de incerteza relevante na espacialização do BHC e, portanto, carece de maior densidade de estações, a fim de captarem a alta variação espacial desta variável. Tal necessidade pode ser suprida se, em alternativa ao uso exclusivo de dados oriundos de estações automáticas, fossem considerados dados pluviométricos de outras fontes que aumentassem a densidade de informação de P, já que para ETo, pode-se utilizar as estações climatológicas. A Agência Nacional de Águas (ANA), por exemplo, disponibiliza dados de precipitação pela Hidroweb.

Pinto et al. (2011) disponibilizou o Atlas Pluviométrico do Brasil, onde foram considerados 140 postos no estado do RS, com dados pluviométricos com 30 anos de observações. Esta densidade no RS refere-se à de $281.748 \text{ km}^2 / 140 \text{ estações} = 2.012,5 \text{ km}^2$ para cada estação, como verificado na Tabela 5. Esta é uma densidade intermediária às simulações de 9 ($1888,9 \text{ km}^2/\text{estação}$) e 8 ($2125 \text{ km}^2/\text{estação}$) estações em Vêneto (Capítulo 6) e, portanto, superior às recomendações da Organização Mundial de Meteorologia (WMO, 2008). Porém, uma verificação específica desta densidade de postos no RS, além das realizadas por Marcuzzo e Melati (2015) e de Melati e Marcuzzo (2015), deve ser feita para cada unidade fisiográfica, conforme WMO (2008) e discutido no Capítulo 6, para confirmar se esta densidade no RS está de acordo com essas recomendações.

Segundo o inventário disponibilizado no site da hidroweb, excluindo-se primeiro os postos que possuíam alguma data de encerramento e depois contabilizando os postos que tiveram algum dado atualizado no ano de 2016, foram totalizados 206 postos da ANA seguramente em funcionamento em 2016, de um total de 1109.

Fazendo uma projeção de no mínimo 20 anos de dados observados nestes postos da ANA, considerando que esta densidade estaria disponível para a espacialização do BHC, a densidade seria de $281.748 \text{ km}^2 / 206 \text{ estações} = 1367,7 \text{ km}^2$ para cada estação, como verificado na Tabela 5. Esta é uma densidade intermediária às simulações de 12 ($1416,7 \text{ km}^2/\text{estação}$) e 13 ($1307,7 \text{ km}^2/\text{estação}$) estações em Vêneto (Capítulo 6) e, portanto, superior

às recomendações da Organização Mundial de Meteorologia (WMO, 2008). Porém, também deve-se verificar se essa concentração está conforme às unidades fisiográficas de WMO (2008), como discutido no Capítulo 6.

Considerando essas possibilidades de fontes de dados, discutidas aqui e apresentadas na Tabela 5, relaciona-se a estes, uma possível ordem de grandeza do erro percentual na média mensal do BHC, conforme as análises do Capítulo 6 desta tese e fazem referência à densidade de estações que possuem ou possuirão dados para uma eventual espacialização do BHC no RS. Embora existam grandes diferenças entre as áreas relacionadas, Vêneto, Itália e RS, Brasil, esta ordem de grandeza pode apontar um alcance, mínimo e máximo, de incertezas, sendo os valores mínimos mais relevantes.

Deve-se considerar que, devido ao fato de que a área de estudo ateu-se apenas à área plana de Vêneto, quando comparamos esta região ao RS, por exemplo, é de se esperar que as incertezas sejam maiores ainda para o RS, devido às riquezas de paisagens presentes no estado, fato esse que não foi considerado no estudo.

Somando estas observações sobre densidade de informação ao emprego do método que calcula o BHC nas estações e depois faz a interpolação destes valores de BHC (princípio Cálculo-Interpolação, método CI), em áreas grandes, como todo o estado do RS, as incertezas destes mapas gerados são os maiores possíveis, certamente não representando adequadamente a realidade de algumas áreas, em especial as porções entre estações, mesmo que os interpoladores sejam os melhores.

Os estudos ainda apontaram que as variáveis P e ETo, para as densidades de estação avaliadas, apresentaram comportamento distinto frente às simulações de ausências de estações. P apresentou um comportamento reflexo da sua variabilidade espacial e temporal característica, indicando ser esta variabilidade uma fonte significativa de incertezas tão maior quando menor a densidade de estações.

Já a ETo apresentou menores impactos em relação à variação de densidade, justamente por ser naturalmente menos diversa espacialmente em comparação à precipitação. Porém, na avaliação percentual, que indicou as incertezas geradas com as diminuições das densidade de estações, a ETo apresentou as maiores incertezas nos meses mais frios. Isso se deve ao fato de que, devido as poucas variabilidades entre os valores de ETo das estações, quando está frio, os valores são muito baixos e, portanto, esta pequena diferença gerada pela ausência de uma estação, proporcionalmente, se torna, em porcentagem, algo significativo.

Este comportamento também ocorre no verão, mas de forma inversa. Quando é calor e a ETo é alta, mesmo com variabilidade levemente maior que no inverno, ao se retirar uma

estação, esta diferença, devido a pouca variabilidade entre postos, não tem influência percentual no total evapotranspirado, ou seja, por exemplo, 10 mm de ETo são percentualmente mais impactantes em 30 mm (inverno) do que são em 100 mm (verão).

A análise de incertezas empregada neste trabalho indicou os meses que apresentaram as maiores incertezas, para cada uma das variáveis: P, ETo e para o BHC. O BHC apresentou maior sensibilidade à densidade de estações nos meses em que o armazenamento de água no solo sofre as maiores influências de entrada ou saída de água e portanto a representação espacial do BHC possui maiores incertezas no começo de épocas de estiagem ou de precipitações, nesta área de estudo.

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve por objetivo avaliar as incertezas do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) em decorrência dos processos de espacialização e da densidade de informação.

Foram analisados dois métodos para a espacialização do BHC: o primeiro consiste em calcular o BHC pontualmente (na estação) e depois espacializá-lo por interpolação destes pontos (princípio Cálculo-Interpolação, CI). O segundo consiste em interpolar cada variável do BHC primeiro e depois calculá-lo para cada pixel (princípio Interpolação-Cálculo, IC). Os resultados mostraram que a utilização do método de espacialização IC do BHC se mostrou mais adequado para representar o BHC para escalas menores (áreas maiores), uma vez que cada cálculo previsto por Thornthwaite e Mather (1955) é aplicado célula a célula, enquanto que o método CI demonstrou gerar maiores incertezas nas áreas entre estações, em especial quando existe déficit hídrico no BHC e/ou recarga do solo.

Como o teste t, aplicado na comparação dos resultados da aplicação dos dois métodos de espacialização do BHC, demonstrou não existir diferença significativa entre os erros gerados nas estações entre esses dois métodos de espacialização, conclui-se que ambos os métodos podem ser empregados na espacialização do BHC. Porém, o método IC apresenta a vantagem de possibilitar a geração de cenários de uso do solo em um mesmo mapa, o que não é possível com o método CI, pois o método IC por ser calculado em cada célula, pode representar um uso diferente para cada célula. Já o método CI precisa calcular o BHC em cada estação, para depois interpolar esses valores.

Essa possibilidade demonstra uma vasta aplicabilidade do método IC - cálculo do BHC de forma distribuída e automatizada - às políticas públicas, pela facilidade de realizar cenarização como suporte aos mais diversos planejamentos, diferenciando regiões e possibilitando melhor adequação destas políticas às realidades de cada local.

Um passo importante foram os testes para análise de distintos métodos interpoladores. Os resultados demonstraram que escolha do método interpolador, visando à maior qualidade da representação espacial do BHC, resulta em redução de fonte de erros e redução de incertezas na estimativa de variáveis interpoladas espacialmente. Portanto, conclui-se que, ao espacializar o BHC, uma avaliação de diferentes interpoladores, por validação cruzada, se faz fundamental para diminuir incertezas.

O trabalho conseguiu demonstrar quais meses podem carregar maiores incertezas em suas espacializações, tanto para precipitação (P), evapotranspiração (ETo) e o BHC e que a alta variabilidade da precipitação carrega incertezas na sua espacialização, enquanto que a

especialização da ETo nos meses mais quentes da área de estudo recebe menos impacto advindo da densidade de estações, proporcionando uma representação espacial com menos incertezas para os meses mais quentes.

Os resultados também permitiram concluir que o Balanço Hídrico Climatológico (BHC) apresenta maior sensibilidade à densidade de estações nos meses em que o armazenamento de água no solo sofre as maiores influências de entrada ou saída de água, em outras palavras, nos meses em que o armazenamento encontra-se menor que o máximo, e portanto a representação espacial do BHC possui maiores incertezas no começo de épocas de estiagem, quando começa o deplecionamento do armazenamento, ou começo das precipitações que provocam o enchimento do reservatório no solo.

Também pode-se concluir que um menor número de estações para o cálculo do BHC pode diminuir a percepção de déficit pelo modelo do BHC nesses meses cuja análise de incerteza aponta sofrerem maior impacto da redução de densidade de estações, justamente por estarem nos limites superiores de déficit e inferiores de excesso hídrico no BHC, ou seja, com armazenamento menor que o volume máximo adotado (CAD).

As incertezas, referentes à verdade de 16 estações, estimadas para a redução de estações de 16 para 3, variaram de 3 a 27% para precipitação, de 1 a 36% para ETo e de 1 a 88% para o BHC. Portanto, houve aumento do erro na espacialização das variáveis trabalhadas, conforme foram diminuídas a quantidade de estações utilizadas nas interpolações, ou seja, as incertezas nas espacializações de P, ETo e BHC aumentam quando a densidade de informação diminui, e vice-versa.

Considerando as densidades mínimas recomendadas pela OMM (WMO, 2008), esta análise de incertezas indica, para a área de estudo, que as mesmas não são suficientes para promover a espacialização do BHC e, portanto, maiores incertezas podem ocorrer em regiões com densidade de informação inferior às analisadas neste trabalho e que foram semelhantes às recomendações mínimas da OMM.

Portanto, com base nas conclusões desta tese, recomenda-se para o uso do método do BHC espacializado com menos incertezas nos resultados: realizar a análise do interpolador, por validação cruzada (ou outro), antes de realizar os cálculos do BHC; utilizar o método IC, que consiste em interpolar os valores de precipitação e evapotranspiração primeiro e depois, calcular o BHC para cada pixel; utilizar densidade de informação superior às recomendações mínimas da OMM para o BHC espacializado, em especial para as redes pluviométricas.

É importante ressaltar a relevância da caracterização da área a ser estudada conforme sua unidade fisiográfica, para que essas recomendações de densidade da OMM sejam

observadas, portanto, recomenda-se que, para uma melhor compreensão das densidades de estações no Rio Grande do Sul (RS), se faça essa divisão territorial em estudos futuros, assim identificando as áreas de maior e menor carência de dados.

Recomenda-se também estudo que verifique a influência da altitude na espacialização do BHC, pois, neste trabalho, utilizou-se de uma área homogênea (área plana de Vêneto), para minimizar as incertezas advindas das altas altitudes dos Alpes ao norte da Itália. Deve-se atentar ao fato de que poderá ser esperada uma maior variabilidade de dados analisados e, se a mesma metodologia para identificar suficiência amostral for utilizada (Capítulo 6), será também esperada uma suficiência amostral maior do que a encontrada em área homogênea. Isso certamente acarretará aumento na quantidade de simulações e conseqüente demora nos cálculos.

Uma observação relevante é que, ao se pensar na utilização do balanço hídrico de forma sequencial (BHS), é de se esperar que os dados utilizados também possuam maior variabilidade entre eles em comparação ao BHC, pois o BHC utiliza de médias longas de observações das variáveis, enquanto que o BHS não. Considerando tal observação, tem-se a dúvida: O BHS não possuirá maiores incertezas quando espacializado? Recomenda-se a continuidade dos estudos, em especial, na espacialização do BHS.

Outro ponto importante sobre a espacialização do BHS, é que recomenda-se verificar a possibilidade de utilização dos dados da ANA, pois, para o BHC, longos períodos de observações, característico das Normais, podem não ser bons, mas para balanços sequenciais, tais dados podem colaborar com aumento significativo na densidade de informação.

REFERÊNCIAS

AGENZIA REGIONALE PER LA PREVENZIONE E PROTEZIONE AMBIENTALE DEL VENETO - ARPAV. **Dati Ambientali**. 2014. Disponível em: <<http://www.arpa.veneto.it/arpav>>. Acesso em: setembro/2014

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. **Food And Agriculture Organization Of The United States - FAO**. Rome, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e06.htm>>. Acesso em: 2014.

BANDOC, G.; PRĂVĂLIE, R. Climatic water balance dynamics over the last five decades in Romania's most arid region, Dobrogea. **Journal of Geographical Sciences**. 2015, 25(11): 1307-1327. DOI: 10.1007/s11442-015-1236-1. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11442-015-1236-1>>. Acesso em: março/2016.

BECHINI, L.; DUCCO, G.; DONATELLI, M.; STEIN, A. Modelling, interpolation and stochastic simulation in space and time of global solar radiation. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.81, p.29-42, 2000. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.384.906&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: maio/2016.

BRASIL. Lei n.º 6.938 de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Legislativo, Brasília, DF, 02 set. 1981. Seção 1, p. 16.509. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938.htm>. Acesso em: agosto, 2016.

_____. Lei n.º 9.433 de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da União**, Poder Legislativo, Brasília, DF, 09 jan. 1997. Seção 1, p. 470. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm>. Acesso em: agosto, 2016.

_____. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Portarias segmentadas por UF**. Brasília, DF. 2016. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/politica-agricola/zoneamento-agricola/portarias-segmentadas-por-uf>>. Acesso em: agosto, 2016.

CARDOSO, C. T. V. **Probabilidade de Ocorrência de Deficiência Hídrica nos Solos da Região Central do Estado do Rio Grande do Sul**. 2005. 186f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

CARVALHO NETO, R. M. **Uso do Balanço Hídrico Climatológico para Subsidiar Tomadas de Decisão Quanto ao Manejo de Bacias Hidrográficas**. 2011. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2011.

CECÍLIO, R. A.; SILVA, K. R. da; XAVIER, A. C.; PEZZOPANE, J. R. M. Métodos para a espacialização dos elementos do balanço hídrico climatológico. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.47, n.4, p.478-488, abr. 2012. Disponível em: <<http://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/10202/6859>>. Acesso em: Abril/2016.

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** 03, 2012. p.694-707. Disponível em: <<http://www.revista.ufpe.br/rbgfe/index.php/revista/article/view/422/311>>. Acesso em: Março/20016.

CRUZ, J. C. **Disponibilidade hídrica para outorga: avaliação de aspectos técnicos e conceituais**. 2001. 199 p. Tese (Doutorado Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 2001. Disponível em: <[www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2602/000323130 .pdf](http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2602/000323130.pdf)>. Acesso em: julho, 2016.

D'ANGIOLELLA, G. VASCONCELLOS, V. L. D.; ROSA, J. W. C. Estimativa e espacialização do balanço hídrico na mesorregião sul da Bahia. **In: Anais. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 83-90**

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Zoneamento agrícola de risco climático: instrumento de gestão de risco utilizado pelo seguro agrícola do Brasil**. Brasília, DF. [200-]. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Zoneamento_agricola_000f17v6vox02wyiv80ispccruh04mek.pdf>. Acesso em: agosto, 2016.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE - ESRI. **ArcGIS**. Sistema de Informação Geográfica para área de trabalho de computador, versão 10.2. 2014. Disponível em: <<https://www.arcgis.com>>. Acesso em: agosto 2014.

FREITAS, J. C. DE; DANTAS, R. T.; ANDRADE, A. R. S. DE; PEREIRA, E. R. R. Analysis of variability of climatic indexes for the state of the Paraíba – PB. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia** v.4, n.2, Mai/Ago, 2011. Print-ISSN 1983-6325 (On line) e-ISSN 1984-7548. Disponível em: <<http://revistas.unicentro.br/index.php/repaa/article/view/1333>>. Acesso em: Março/2016.

GARCIA, A. Balanço hídrico de Ituverava (SP) sob condições de cenários climáticos futuros. **Nucleus**, v.7, n.1, p. 217 - 222. abr. 2010

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied engineering in agriculture**, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985. Disponível em: <<http://libcatalog.cimmyt.org/download/reprints/97977.pdf>>. Acesso em: agosto, 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Mapas do Boletim Agroclimatológico**. 2016. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/html/agro.html>>. Acesso em: abril/2016.

INSTITUTO PORTUGUÊS DE QUALIDADE - IPQ; INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA - INMETRO. **Vocabulário internacional de metrologia**. 2012. Disponível em: <www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf>. Acesso em: julho, 2016.

JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY - JCGM. **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. International Organization for Standardization**. 2008. Disponível em: <www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf>. Acesso em: julho, 2016.

KUNDZEWICZ, Z. W. Hydrological uncertainty in perspective. In: KUNDZEWICZ, Z. W. et al. **New uncertainty concepts in hydrology and water resources**. Cambridge University Press. UK. 2006. cap 1. Disponível em : <https://books.google.com.br/books?hl=en&lr=&id=3T0arc-D_dUC&oi=fnd&pg=PP1&dq=hydrological+uncertainty+in+perspective&ots=aDlkhYs9e3&sig=OotpJsdfvpvQT9gu0-pVoRbtcpM#v=onepage&q=hydrological%20uncertainty%20in%20perspective&f=false>. Acesso em: julho, 2016.

LEAO, S. Mapping 100 Years of Thornthwaite Moisture Index: Impact of Climate Change in Victoria, Australia. **Geographical Research**. August 2014. 52(3):309–327 309 doi: 10.1111/1745-5871.12072. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1745-5871.12072/abstract>>. Acesso em: abril/2016.

LIU, Y.; GUPTA, H. V. Uncertainty in hydrologic modeling: Toward an integrated data assimilation framework. **Water Resources Research**, v. 43, n. 7, 2007. Disponível em: <http://amazon.nws.noaa.gov/articles/HRL_Pubs_PDF_May12_2009/New_Scans_January_2010/Gupta_DA_review_WRR_2007.pdf>. Acesso em: julho, 2016.

LUCAS, D. D. P.; HELDWEIN, A. B.; MALDANER, I. C.; TRENTIN, R.; HINNAH, F. D.; SILVA, J. R. DA. Excedente hídrico em diferentes solos e épocas de semeadura do girassol no Rio Grande do Sul. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.50, n.6, p.431-440, jun. 2015. DOI: 10.1590/S0100-204X2015000600001. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pab/v50n6/0100-204X-pab-50-06-00431.pdf>>. Acesso em : Março/2016.

MARCUZZO, F. F. N.; MELATI, M. D. Cálculo de densidade pelos critérios da OMM e espacialização de novas estações P e Pr na sub-bacia 85. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., 2015, Brasília, DF. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2015. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/15061/PAP018953.pdf?sequence=1>>. Acesso em: maio/2016.

MELATI, M. D.; MARCUZZO, F. F. N. Espacialização da recomendação de novas estações pluviométricas na sub-bacia 87 segundo os critérios de densidade da Organização Mundial de Meteorologia. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., (SBSR), 2015, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015. 1 DVD. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0010.pdf>>. Acesso em: maio 2016.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Olhares sobre as políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido. In: GHEYI, H. R. et al. (ed.). **Recursos hídricos em regiões semiáridas: estudos e aplicações**. Campina Grande, PB: Instituto Nacional do Semiárido, Cruz das Almas, BA: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2012. Disponível em: <http://www.insa.gov.br/wp-content/themes/insa_theme/acervo/recursos-hidricos-II.pdf>. Acesso em: agosto, 2016.

MOREIRAS, C. I. P. **Análise de incertezas em ensaios de qualidade**. Dissertação (Mestrado em Estatística Aplicada e Modelação). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto. 2005. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/57754/2/Texto%20integral.pdf>>. Acesso em: julho, 2016.

NETO, E. da S. P.; SILVA, S. H. G. da. O uso do software "Celina" no estudo do balanço hídrico e na busca da promoção de políticas públicas nos municípios do estado do Ceará. I Workshop Internacional Sobre Água no Semiárido Brasileiro. Campina Grande - PB. **Anais...** 2014. Disponível em: <http://editorarealize.com.br/revistas/aguanosemiarido/trabalhos/Modalidade_4datahora_06_11_2013_12_18_40_idinscrito_269_76c1894af8e4889dd9666df0d4d1ca1a.pdf>. Acesso em: agosto, 2016.

NEVES, S. M. A. DA S.; NUNES, M. C. M.; NEVES, R. J. Caracterização das condições climáticas de Cáceres/MT - Brasil, no período de 1971 a 2009: subsídio às atividades agropecuárias e turísticas municipais. **B.goiano.geogr, Goiânia**, v. 31, n. 2, p. 55-68, jul./dez. 2011. Disponível em: <<https://revistas.ufg.emnuvens.com.br/bgg/article/view/16845/10255>>. Acesso em: março 2016.

OLIVEIRA, G. G. de; PEDROLLO, O. C.; CASTRO, N. M. dos R. As incertezas associadas às condições climáticas obtidas pelo modelo Eta CPTEC/HadCM3: avaliação comparativa entre os dados simulados e observados de precipitação, evapotranspiração e vazão na bacia hidrográfica do rio Ijuí, Brasil. **Rev. bras. meteorol.**, São Paulo, v. 30, n. 1, p. 101-121, Mar. 2015. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v30n1/0102-7786-rbmet-30-01-00101.pdf>>. Acesso em: julho, 2016.

ORLANDINI, D. et al. Potencialidades das regiões brasileiras para instalação de uma fábrica de celulose. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.35, n.5, p.1053-1060, 2011.

PARANÁ. Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **O que são Políticas Públicas?** Curitiba, PR. [201-]. Disponível em: <http://s.busca.pr.gov.br/search?site=meioambiente_collection&btnG=Buscar&client=meioambiente_frontend&output=xml_no_dtd&proxystyle sheet=meioambiente_frontend&sort=date%253AD%253AL%253Ad1&oe=UTF-8&ie=UTF-8&ud=1&exclude_apps=1&tlen=100&filter=0&sitesearch=meioambiente.pr.gov.br&q=pol%C3%ADticas+p%C3%ABlicas>. Acesso em: agosto, 2016.

PEREIRA, A. R. Simplificando o Balanço Hídrico de Thornthwaite-Mather. **Bragantia**, Campinas, v.64, n.2, p.311-313, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052005000200019>. Acesso em: 2010.

PEREIRA, R. J. C. **Análise de Correlação entre Alterações na Cobertura Vegetal e o Comportamento Hidrológico na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira - RJ**. Rio de Janeiro, 2012. 86p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

PINTO, E. J. de A.; AZAMBUJA, A. D.; FARIAS, J. A. M.; SALGUEIRO, J. D. B.; PICKBRENNER, K. **Atlas pluviométrico do Brasil**: isoietas mensais, isoietas trimestrais, isoietas anuais, meses mais secos, meses mais chuvosos, trimestres mais secos, trimestres mais chuvosos. Brasília: CPRM, v. 1, 2011. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html>>. Acesso em: agosto de 2016.

PINTO, N. L. S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Edgard Blucher/FNME, 1976. 278 p.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **Python Language Reference**. Versão 2.7. Disponível em: <<http://www.python.org>>. Acesso em: setembro, 2014.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. **Bases dos estudos de fauna, flora e recursos hídricos**. 3 vol. Porto Alegre: SEMA, 2010a. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/silvicultura/BasesEstudos_Fauna_Flora_RH.zip>. Acesso em: 17 jun. 2011.

_____. **Zoneamento ambiental da silvicultura**. Estrutura, metodologia e resultados. 1 vol. Porto Alegre: RIO GRANDE DO SUL, 2010b. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/silvicultura/V1_ZAS%20APROVADO%20CONSOLIDADO%20CORRIGIDO%20V-18-05-2010.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2013.

_____. **Zoneamento ambiental para atividade de silvicultura**. 1 vol. Porto Alegre: RIO GRANDE DO SUL, 2007.

ROSSATO, L. **Estimativa da capacidade de armazenamento de água no solo do Brasil**. São José dos Campos: INPE, 2001. 145p. (INPE-8915-TDI/809).

SANTOS, C. V. B. dos; MOURA, M. S. B. de; SOUZA, L. S. B. de. Efeitos do aumento da temperatura no balanço hídrico climatológico do município de Ribeira do Pombal-BA. In: MOSTRA DE PESQUISAS DA UPE, 4., 2012, Universidade de Pernambuco, Campus de Petrolina. **Anais...**, Petrolina: Embrapa Semiárido. 2012. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/74499/1/Magna-2012.pdf>>. Acesso em: julho, 2016.

SANTOS, G. O.; LIMA, F. B. DE; VANZELA, L. S. Balanço hídrico espacial das culturas inseridas na bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Rita, noroeste paulista. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**. v.7, n.º. 1, p. 03-16, 2013. ISSN 1982-7679 (On-line). Fortaleza, CE, INOVAGRI. DOI: 10.7127/rbai.v7n100091

SANTOS, H. G. dos et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3 ed. rev. ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2013. 353 p. Disponível em: <<http://server1.docfoc.com/uploads/Z2016/01/04/dPYPGwIY1r/df34f855c7edc99a4cb40f0a5191519d.pdf>>. Acesso em: agosto, 2016.

SILVA, D. C. V. da; ALMEIDA, E. G. de; LANA, J. T. de O.; HAMADA, E. Desenvolvimento de sistema de visualização do balanço hídrico climatológico do Brasil: VisBHClima. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 6., 2012, Jaguariúna. **Anais...** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2012. 1 CD ROM. Nº 12403. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/73718/1/2012AA022.pdf>>. Acesso em: Março/2016.

SILVA, D. C. V. da; HAMADA, E.; ALMEIDA, E. G. de; LANA, J. T. de O.; PEREIRA, R. A. S. M. Aplicativo para consulta e visualização do balanço hídrico climatológico do Brasil. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 5., 2011, Campinas. **Anais...** Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2011. 1 CD ROM. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/916323>>. Acesso em: Março/2016.

SILVA, V. P. R. da, OLIVEIRA, S. D. de; SANTOS, C. A. C. dos; SILVA, M. T. Risco climático da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 180-189, 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Madson_Silva/publication/281975005_Risco_climatico_da_cana-de-acucar_cultivada_na_regiao_Nordeste_do_Brasil/links/56006d0c08aeafc8ac8c7542.pdf>. Acesso em: março, 2016.

THORNTHWAITE, C.W. An approach towards a rational classification of climate. **Geographical Review**, London, v.38, p.55-94, 1948. Disponível em: <<https://www.unc.edu/courses/2007fall/geog/801/001/www/ET/Thornthwaite48-GeogrRev.pdf>>. Acesso em: 2012.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (Publications in Climatology, vol. VIII, n.1).

TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L. F. S. Evaporação e evapotranspiração. In: TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4 ed., Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2009. 943 p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS, Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2005

VALERIANO, M. M., PICINI, A. G. **Geoprocessamento de informações agroclimatológicas**. São José dos Campos: INPE, 2003. 133 p. (INPE-10128- RPQ/751). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/marciana/2003/12.09.09.48>>. Acesso em: Abril/2016.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245p.

WANG, M.; PAEGLE, J. Impact of analysis uncertainty upon regional atmospheric moisture flux. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 101, n. D3, p. 7291-7303, 1996. Disponível em: http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/95JD02896/epdf?r3_referer=wol&tracking_action=preview_click&show_checkout=1&purchase_referrer=scholar.google.com&purchase_site_license=LICENSE_DENIED>. Acesso em: julho, 2016.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION - WMO. Methods of observation. In: **Guide to Hydrological Practices: hydrology from measurement to hydrological information**. 6. ed. Geneva, Switzerland, 2008. v. 1, cap. 2, p. 24-27. (WMO - n. 168). Disponível em: http://www.whycos.org/chy/guide/168_Vol_I_en.pdf>. Acesso em: 8 jul. 2016.