

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

Taise Cristine Buske

**MODELAGEM DA PERDA DE PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO
MILHO EM FUNÇÃO DA DEFICIÊNCIA HÍDRICA**

Santa Maria, RS
2017

Taise Cristine Buske

**MODELAGEM DA PERDA DE PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO MILHO EM
FUNÇÃO DA DEFICIÊNCIA HÍDRICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutora em Engenharia Agrícola**.

Orientador: Prof. Dr. Adroaldo Dias Robaina

Santa Maria, RS
2017

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

Buske, Taise Cristine
MODELAGEM DA PERDA DE PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO
MILHO EM FUNÇÃO DA DEFICIÊNCIA HÍDRICA / Taise Cristine
Buske.- 2017.
80 p. ; 30 cm

Orientador: Adroaldo Dias Robaina
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2017

1. Déficit hídrico 2. Modelos agrometeorológicos 3.
Quebra de rendimento I. Robaina, Adroaldo Dias II. Título.

Taise Cristine Buske

**MODELAGEM DA PERDA DE PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO MILHO EM
FUNÇÃO DA DEFICIÊNCIA HÍDRICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutora em Engenharia Agrícola**.

Aprovado em 01 de setembro de 2017:

Adroaldo Dias Robaina, Dr. (UFSM)
(Presidente/ Orientador)

Fátima Cibéle Soares, Dr.^a (UNIPAMPA)

Gisele Aparecida Vivan, Dr.^a (IFSul – Campus Bagé)

Ricardo Benetti Rosso, Dr. (IFC – Campus Concórdia)

Tonismar dos Santos Pereira, Dr. (UNIPAMPA)

Santa Maria, RS
2017

AGRADECIMENTOS

À Deus.

A minha família pelo carinho, apoio e compreensão em todos os momentos.

Ao professor e orientador Adroaldo Dias Robaina pela orientação, dedicação e amizade.

A professora e co-orientadora Marcia Xavier Peiter pelos ensinamentos e oportunidades oferecidas.

A comissão examinadora pela responsabilidade e empenho na avaliação da Tese.

A Universidade Federal de Santa Maria, especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela possibilidade de realização do Doutorado.

Ao Instituto Federal Catarinense, Campus Rio do Sul e Campus Santa Rosa do Sul, pelo incentivo à conclusão do curso de doutorado.

Aos alunos Nilva Alice Gaspar e Lucas Eduardo Oliveira Aparecido do IF Sul de Minas Gerais – Campus Muzambinho, desenvolvedores do *software* Syswab pela ajuda prestada.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Engenharia de Irrigação pelos momentos de descontração e amizade.

A todos meus amigos que contribuíram de uma forma ou outra durante esta jornada.

Muito obrigada.

“Hoje, neste tempo que é seu, o futuro está sendo plantado. As escolhas que você procura, os amigos que você cultiva, as leituras que você faz, os valores que você abraça, os amores que você ama, tudo será determinante para a colheita futura.”

Padre Fábio de Melo

RESUMO

MODELAGEM DA PERDA DE PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO MILHO EM FUNÇÃO DA DEFICIÊNCIA HÍDRICA

AUTORA: Taise Cristine Buske
ORIENTADOR: Adroaldo Dias Robaina

A mesorregião Noroeste do Rio Grande do Sul é caracterizada pela predominância de culturas de primavera-verão, sendo o milho importante item do sistema de produção. Dentre os componentes limitantes, o déficit hídrico é aquele que afeta a produção agrícola com maior frequência e intensidade. Visando caracterizar os efeitos das variações climáticas sobre a produtividade de grãos têm-se utilizados os modelos agrometeorológicos, que são muito úteis pois exigem poucos dados de entrada. Portanto, objetivou-se avaliar as perdas de produtividade da cultura do milho cultivado em condições de sequeiro, em relação à produtividade potencial na microrregião de Cruz Alta, RS. O trabalho foi desenvolvido utilizando dados meteorológicos diários, no período de 1993-2014. Os dados de produtividade do milho foram obtidos no site do IBGE. Para estimar a produtividade real da cultura foram adotados os modelos agrometeorológicos de Jensen (1968), Minhas, Parikh e Srinivasan (1974) e, Doorenbos e Kassan (1979). A evapotranspiração de referência foi estimada pelo método de Penman-Montheit, já a evapotranspiração real foi utilizando o método do balanço hídrico segundo Thornthwaite e Mather (1955). Na determinação da produtividade potencial foram utilizados os métodos de Wageningen (MWA) e o da Zona Agroecológica (MZA). Ainda, foram simuladas as combinações para o plantio em setembro, outubro, novembro e dezembro. Inicialmente fizeram-se as análises com parâmetros dos modelos agrometeorológicos recomendados na literatura, posteriormente foi realizado um ajuste dos mesmos. A precisão da estimativa de cada modelo agrometeorológico foi determinada a partir de análise de regressão linear, realizada entre os valores anuais de produtividade real observada e estimada. Nota-se que o MWA tende a superestimar a produtividade enquanto que o método MZA acompanhou melhor as flutuações dos resultados. De maneira geral, os modelos agrometeorológicos testados nas diferentes conjunções, com parâmetros recomendados na literatura, apresentaram coeficiente de determinação insatisfatório e o desempenho variou de péssimo até mediano. Após a realização dos ajustes nos parâmetros dos modelos ficou evidente a melhora no coeficiente de determinação, exceto para o modelo de Doorenbos e Kassan. O desempenho das diferentes combinações variou de péssimo até muito bom, sendo que o modelo de Jensen foi classificado como muito bom em outubro e novembro, resultado que também foi encontrado para o modelo de Minhas, Parikh e Srinivasan em novembro. Recomendam-se os coeficientes de -0,768, 0,699, 0,374 e -0,330 para o modelo de Jensen, e os coeficientes de -1,438, 1,078, 0,439 e -0,442 para o modelo de Minhas, Parikh e Srinivasan, conforme o estágio fenológico I, II, III e IV, respectivamente. Também, observou-se quebra de rendimento na maioria dos anos estudados, notoriamente nas faixas maiores de 30% de perda de produtividade, podendo atingir frequência relativa de 30% para outubro, novembro e dezembro. Inclusive na faixa com menos de 10% de perdas,

em qualquer época avaliada, foram observados prejuízos em 15% dos anos. Verificou-se que a cultura do milho é afetada pela deficiência hídrica na primavera-verão, ocasionando riscos de obtenção de produtividade de grãos abaixo da expectativa.

Palavras-chave: Déficit hídrico. Modelos agrometeorológicos. Quebra de rendimento.

ABSTRACT

MODELING THE LOSS OF PRODUCTIVITY IN MAIZE CULTURE IN THE FUNCTION OF WATER DEFICIENCY

AUTHOR: Taise Cristine Buske
ADVISOR: Adroaldo Dias Robaina

The Northwest mesoregion of Rio Grande do Sul is characterized by the predominance of spring-summer crops, with maize being an important item in the production system. Among the limiting components, the water deficit is one that affects agricultural production with greater frequency and intensity. In order to characterize the effects of climatic variations on grain yield, agrometeorological models have been used, which are very useful because they require very little input data. Therefore, this study aimed to evaluate the yield losses of maize cultivated under rainfed conditions in relation to the potential productivity in the Cruz Alta micro region of the state of Rio Grande do Sul. The study was developed using daily meteorological data, in the period of 1993-2014. Maize yield data were obtained from the IBGE website. In order to estimate the actual productivity of the crop the agrometeorological models of Jensen (1968), Minhas, Parikh and Srinivasan (1974) and, Doorenbos and Kassan (1979) were adopted. The reference evapotranspiration was estimated by the Penman-Montheit method, as for the estimation of the actual evapotranspiration was used the water balance method according to Thornthwaite and Mather (1955). In the determination of potential productivity the Wageningen and Agroecological Zone methods were used. Also, the planting combinations were simulated in September, October, November and December. Initially, the analyzes were carried out with parameters of the agrometeorological models recommended in the literature, later an adjustment of the same was done. The accuracy of the estimation of each agrometeorological model was determined from the linear regression analysis, performed between the annual values of observed and estimated real productivity. It is noted that MWa tends to overestimate the potential productivity, whereas the MZA method better tracked the fluctuations of the results. In general, the agrometeorological models tested in the different conjunctions, with parameters recommended in the literature, presented an unsatisfactory coefficient of determination and the performance ranged from poor to medium. After adjusting the parameters of the models, the improvement in the coefficient of determination was evident, except for Doorenbos and Kassan. The performance of the different combinations ranged from poor to very good, and Jensen's model was rated very good in October and November, a result that was also found for the model of Minhas, Parikh and Srinivasan in November. The recommended coefficients are -0.768, 0.699, 0.374 and -0.330 for the Jensen model, and -1.438, 1.078, 0.439 and -0.442 for the Minhas, Parikh and Srinivasan model, according to the phenological stage I, II, III and IV, respectively. It was also observed a drop in yield in most of the studied years, notoriously in the bands greater than 30% of productivity loss, being able to reach relative frequency of 30% for October, November and December. Even in the range with less than 10% of losses, in any evaluated period, losses were observed in 15%

of the years. It was verified that the maize crop is affected by the water deficit in the spring-summer period, causing risks of obtaining grain yield below the expectation.

Keywords: Water deficit. Agrometeorological models. Break of yield.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Estádios fenológicos de uma planta de milho, pela escala de Ritchie, Hanway e Benson (1993).....	19
Figura 2 -	Quantidades produzidas de milho em grão no período de 2013 a 2015 no RS.....	31
Figura 3 -	Localização da microrregião geográfica de Cruz Alta/ RS.....	32
Figura 4 -	Tela principal do SYSWAB e janela de cálculo do balanço hídrico...	37
Figura 5 -	Balanço hídrico do período de estudo para a cultura do milho na microrregião de Cruz Alta/ RS, CAD 100 mm.....	44
Figura 6 -	Comparação entre os métodos MZA e MWa de estimativa de produtividade potencial da cultura do milho para plantio em setembro (A), outubro (B), novembro (C) e dezembro (D) na região de Cruz Alta/ RS.....	48
Figura 7 -	Comparação entre os métodos MZA e MWa de estimativa de produtividade real da cultura do milho através do modelo de Jensen (1968) para plantio em setembro (A), outubro (B), novembro (C) e dezembro (D) na região de Cruz Alta, RS.....	49
Figura 8 -	Análise de regressão linear entre os valores observados de produtividade real da cultura do milho e estimados com os modelos de: (A) JENSEN (1968); (B) MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974); (C) DOORENBOS e KASSAN (1979), empregando os parâmetros obtidos na bibliografia para o plantio em outubro.....	52
Figura 9 -	Análise de regressão linear entre os valores observados de produtividade real da cultura do milho e estimados com os modelos de: (A) JENSEN (1968); (B) MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974); (C) DOORENBOS e KASSAN (1979), empregando os parâmetros obtidos na bibliografia para plantio em novembro.....	53
Figura 10 -	Análise de regressão linear entre os valores observados de produtividade real da cultura do milho e estimados com os modelos de: (A) JENSEN (1968); (B) MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974); (C) DOORENBOS e KASSAN (1979), empregando os parâmetros ajustados com os dados da região de Cruz Alta/ RS, para o plantio em outubro.....	58
Figura 11 -	Análise de regressão linear entre os valores observados de produtividade real da cultura do milho e estimados com os modelos de: (A) JENSEN (1968); (B) MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974); (C) DOORENBOS e KASSAN (1979), empregando os parâmetros ajustados com os dados da região de Cruz Alta/ RS, para o plantio em novembro.....	59
Figura 12 -	Análise de regressão linear entre os valores observados de produtividade real da cultura do milho e estimados com os modelos de: (A) JENSEN (1968); (B) MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974); (C) DOORENBOS e KASSAN (1979), empregando os parâmetros ajustados com os dados da região de Cruz Alta/ RS, para o plantio em dezembro.....	60
Figura 13 -	Frequência de perda da produtividade potencial para a cultura do milho na região de Cruz Alta/ RS.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Modelos agrometeorológicos com seus respectivos: autores, equações e parâmetros.....	34
Tabela 2 -	Fator hídrico de penalização da produtividade por déficit para o modelo de Jensen (1968), para os grupos de maturação de milho precoce e normal.....	35
Tabela 3 -	Coeficientes de correção de temperatura para a cultura de milho...	38
Tabela 4 -	Máxima radiação solar de onda curta ativa (R_{se} em $cal\ cm^{-2}\ d^{-1}$) e taxa de produção de matéria seca bruta para uma localidade com céu limpo (y_c em $Kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$) e taxa de produção de matéria seca bruta para uma localidade nublada e cultura padrão (y_o em $Kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$).....	39
Tabela 5 -	Taxa de produção de matéria seca (y_m) em função da temperatura.....	41
Tabela 6 -	Critério de interpretação do desempenho dos métodos pelo índice C.....	43
Tabela 7 -	Índice de Satisfação de Necessidade de Água (ISNA) para a cultura do milho na microrregião de Cruz Alta/ RS.....	45
Tabela 8 -	Valores dos coeficientes linear e angular da reta e seu respectivo coeficiente de determinação para os modelos de: (A) JENSEN (1968); (B) MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974); (C) DOORENBOS e KASSAN (1979), com parâmetros recomendados na literatura.....	51
Tabela 9 -	Valores do coeficiente de correlação, índice de concordância, índice de desempenho e sua respectiva interpretação para os modelos de: (A) JENSEN (1968); (B) MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974); (C) DOORENBOS e KASSAN (1979), com parâmetros recomendados na literatura.....	54
Tabela 10 -	Valores dos parâmetros ajustados com os dados da região de Cruz Alta/ RS para os modelos de: (A) Jensen (1968); (B) Minhas, Parikh e Srinivasan (1974); (C) DOORENBOS e KASSAN (1979)..	56
Tabela 11 -	Valores dos coeficientes linear e angular da reta e seu respectivo coeficiente de determinação para os modelos de: (A) JENSEN (1968); (B) MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974); (C) DOORENBOS e KASSAN (1979), utilizando parâmetros ajustados com os dados da região de Cruz Alta/ RS.....	57
Tabela 12 -	Valores do coeficiente de correlação, índice de concordância, índice de desempenho e sua respectiva interpretação para os modelos de: (A) JENSEN (1968); (B) MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974); (C) DOORENBOS e KASSAN (1979), utilizando parâmetros ajustados com os dados da região de Cruz Alta/ RS.....	61
Tabela 13 -	Quebra de rendimento da cultura do milho na região de Cruz Alta/ RS.....	63

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 CULTURA DO MILHO	17
2.1.1 Estádios fenológicos da cultura e períodos críticos	18
2.1.2 Necessidades climáticas da cultura	20
2.1.3 Necessidades hídricas da cultura e irrigação	21
2.2 MODELAGEM DO RENDIMENTO DE GRÃOS DE MILHO	22
2.2.1 Modelos de correlação	23
2.3 MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS	24
2.3.1 Evapotranspiração	26
2.3.1.1 <i>Estimativa da evapotranspiração máxima ou potencial</i>	26
2.3.1.2 <i>Estimativa da evapotranspiração real</i>	27
2.3.2 Estimativa do rendimento	28
2.3.2.1 <i>Estimativa do rendimento potencial</i>	28
2.3.2.2 <i>Estimativa do rendimento real</i>	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 REGIÃO DE ESTUDO	31
3.2 DADOS METEOROLÓGICOS	33
3.3 DADOS DA CULTURA	33
3.4 MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS	34
3.4.1 Parâmetros dos modelos	35
3.4.2 Evapotranspiração potencial (ETp)	35
3.4.3 Evapotranspiração real (ETr)	36
3.4.4 Rendimento potencial (Yp)	37
3.4.5 Rendimento real (Yr)	41
3.5 AJUSTES DOS PARÂMETROS	41
3.6 AVALIAÇÕES ESTATÍSTICAS	42
3.7 QUEBRÁ DE RENDIMENTO	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1 ANÁLISE DO BALANÇO HÍDRICO	44
4.2 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE POTENCIAL	47
4.3 DESEMPENHO DOS MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS NA ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE REAL	50
4.3.1 Análise de regressão linear entre produtividade real observada e estimada, com parâmetros recomendados na literatura	50
4.3.2 Análise de regressão linear entre produtividade real observada e estimada, utilizando parâmetros ajustados com os dados da região de Cruz Alta/ RS	55
4.4 FREQUÊNCIA DE PERDA DE PRODUTIVIDADE POTENCIAL	63
5 CONCLUSÃO	67
REFERÊNCIAS	68
APÊNDICES	76
APÊNDICE A – PRODUTIVIDADE POTENCIAL DA CULTURA DO MILHO ESTIMADA PELOS MÉTODOS DE MZA E MWa NA REGIÃO DE CRUZ ALTA/ RS	77
APÊNDICE B – PRODUTIVIDADE REAL DA CULTURA DO MILHO ESTIMADA PELO MÉTODO DE JENSEN (1968) NA REGIÃO DE CRUZ ALTA/ RS	78

APÊNDICE C – PRODUTIVIDADE REAL DA CULTURA DO MILHO ESTIMADA PELO MÉTODO DE MINHAS, PARIKH E SRINIVASAN (1974) NA REGIÃO DE CRUZ ALTA/ RS.....	79
APÊNDICE D – PRODUTIVIDADE REAL DA CULTURA DO MILHO ESTIMADA PELO MÉTODO DE DOORENBOS E KASSAN (1979) NA REGIÃO DE CRUZ ALTA/ RS.....	80

1 INTRODUÇÃO

A agricultura no estado do Rio Grande do Sul é caracterizada pela predominância de culturas de primavera-verão, as quais respondem por grande parte da produção total de grãos do Estado. O milho é um importante produto deste sistema, sendo que a produção deste cereal representa mais de 30% do total de grãos produzidos, tendo destacada importância na alimentação humana e animal. A mesorregião Noroeste Rio Grandense caracteriza-se por apresentar uma significativa influência na geração de renda a partir do setor agropecuário, setor altamente dependente das variabilidades climáticas.

O milho é predominantemente cultivado em condições de sequeiro, ou seja, sem suplementação hídrica por irrigação, o que determina grande variabilidade interanual da produção dessa cultura. A precipitação pluviométrica anual é, na maioria dos casos, suficiente para grande parte das culturas agrícolas. Entretanto, as culturas podem estar sujeitas a excesso ou falta de água em seus períodos críticos, o que provoca a variabilidade anual de produção e redução dos índices produtivos da região. Dentre os componentes limitantes, o déficit hídrico é aquele que afeta a produção agrícola com maior frequência e intensidade.

A modelagem, utilizando-se dados meteorológicos da região produtora, tem se mostrado uma ótima ferramenta para a simulação das produtividades de grãos antes da colheita. Tendo como benefícios a redução dos custos, tempo e mão-de-obra, além do que a estimativa da produção não é influenciada por eventuais fatores externos, alheios ao tratamento aplicado. A simulação permite também, a incorporação no modelo da avaliação da produção ao longo de grandes períodos (anos) e as condições econômicas e climáticas de cada período de safra.

Visando caracterizar os efeitos das variações climáticas sobre a produtividade de grãos têm-se utilizado os modelos agrometeorológicos. Estes apresentam como característica fundamental o pequeno número de dados de entrada, o que os torna muito úteis para um adequado entendimento das relações clima-planta e também podem servir para prognósticos de comportamento das plantas dada uma determinada condição. Dessa forma, é possível avaliar as estratégias mais adequadas em cada condição, podendo-se modificar a estratégia de irrigação para prever as alterações nos componentes de produção e de outras variáveis, como a

evapotranspiração e as necessidades de água da cultura. Além disso, é possível, também, combinar os resultados do modelo com os fatores econômicos, para a análise de riscos associados a cada estratégia.

Frente as questões levantadas foram formuladas as seguintes hipóteses de pesquisa: (i) é possível estimar a produtividade da cultura do milho via modelos agrometeorológicos; (ii) os modelos agrometeorológicos são eficientes em prever a produtividade da cultura do milho quando comparados às produtividades locais; (iii) existe risco de quebra de rendimento da cultura do milho, devido à deficiência hídrica, na microrregião de Cruz Alta/ RS.

Assim o presente trabalho apresenta como objetivo geral avaliar as perdas de produtividade da cultura do milho cultivado em condições de sequeiro em relação a produtividade potencial, na microrregião de Cruz Alta, RS. Os objetivos específicos são:

1) estimar a produtividade potencial da cultura do milho com os modelos apresentados pela FAO: método de Wageningen (MWA) e o método da Zona Agroecológica (MZA);

2) estimar a produtividade real da cultura do milho com os modelos agrometeorológicos adotados: Jensen (1968); Minhas, Parikh e Srinivasan (1974); Doorenbos e Kassan (1979);

3) verificar a capacidade preditiva dos modelos agrometeorológicos estudados e comparar as estimativas com índices de produtividade locais;

4) realizar os ajustes dos parâmetros dos modelos agrometeorológicos visando possíveis melhorias na estimativa das produtividades;

5) avaliar a perda de produtividade potencial da cultura do milho na microrregião de Cruz Alta, RS.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir fez-se uma revisão dos principais assuntos que fundamentam este trabalho.

2.1 CULTURA DO MILHO

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho, uma das principais commodities agrícolas negociada nos mercados internacionais, produzindo aproximadamente 8% do total no mundo. É superado pelos Estados Unidos que produz cerca de 36% e pela China que produz 21% do total da produção mundial. Entre as unidades da federação, o Rio Grande do Sul é atualmente o sexto maior produtor de milho em grão do Brasil, superado pelos Estados do Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Goiás, Paraná e Mato Grosso, de acordo com Atlas Socioeconômico do RS (2017). O Rio Grande do Sul registrou na primeira e segunda safra 2016/2017 a produção de 6.036,8 mil toneladas do grão em 804,9 mil ha totalizando a produtividade de 7.500 kg/ha, segundo dados da CONAB (2017).

Deve-se observar, no entanto, que a área cultivada com milho no Rio Grande do Sul teve uma grande retração. Ao se comparar as safras de 1992 e 2011, observa-se redução de 45,3% na área cultivada e aumento de 78,4% na produtividade, segundo Rodrigues e Silva (2011). Assim, com base na relação quantidades produzidas - área plantada, no período considerado, pode-se observar um relativo ganho de produtividade no RS através do emprego de novas tecnologias e do manejo do solo, como por exemplo, o método de plantio direto.

O sistema plantio direto somente se consolida com a utilização de rotação de culturas e a inserção da cultura do milho em rotação com outras culturas é bastante vantajosa, tanto pelo tipo de sistema radicular, quanto pela quantidade alta de biomassa aportada ao solo, como resíduos culturais (EMYGDIO et al., 2013). Vale lembrar que o cultivo do milho no Rio Grande do Sul é, em geral, consorciado com a cultura da soja, entre outras culturas, e que é possível obter o produto através de mais de uma safra anual. E ainda, o seu cultivo está fortemente relacionado com a cadeia de produção agroindustrial de aves e suínos.

O milho (*Zea mays*) é uma espécie anual da família das poáceas, pertencente ao grupo de plantas com metabolismo fotossintético do tipo C4 e com ampla adaptação a diferentes ambientes. Por ser uma espécie C4, que se caracteriza pelo elevado potencial produtivo, o milho tende a expressar sua elevada produtividade quando a máxima área foliar coincidir com a maior disponibilidade de radiação solar, desde que não haja déficit hídrico (BERGAMASCHI et al., 2004). Entre as culturas de cereais o milho tem a mais alta produtividade, podendo ser explorada nos trópicos e nos subtropicais, inclusive em regiões semiáridas em condições adequadas de água e fertilidade do solo (FIGUEREDO JR., 2004).

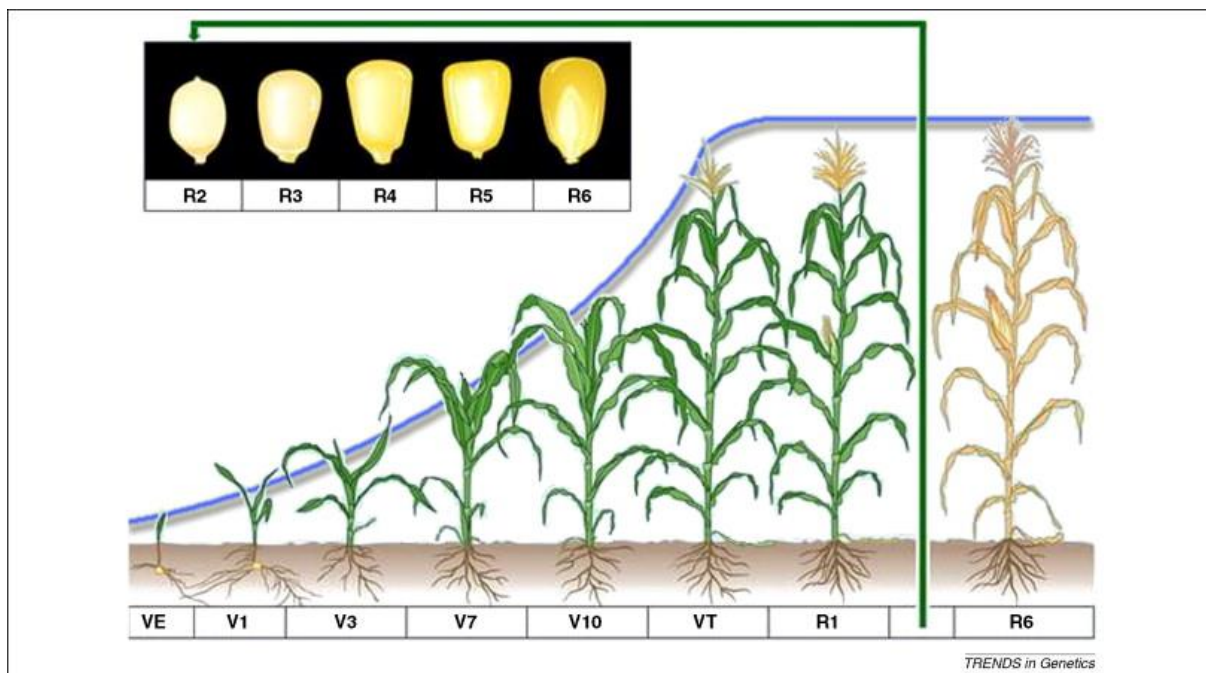
2.1.1 Estádios fenológicos da cultura e períodos críticos

O ciclo de desenvolvimento das plantas de milho compreende dois períodos: vegetativo, com subperíodos semeadura-emergência, emergência-diferenciação dos primórdios florais e diferenciação dos primórdios florais-florescimento; e reprodutivo, com subperíodos florescimento-polinização, polinização-maturação fisiológica e maturação fisiológica-colheita (RODRIGUES e SILVA, 2011).

Ao final do século XX, a escala de Ritchie, Hanway e Benson (1993) passou a ser adotada na descrição da fenologia do milho (Figura 1). Os símbolos que representam os estádios vegetativos são formados pela letra V e um algarismo que corresponde ao número de folhas totalmente expandidas, sendo que VE corresponde a emergência, V1 a primeira folha e VT o pendoamento. Os estádios reprodutivos foram divididos em R1 espigamento (polinização), R2 grão em bolha, R3 grão leitoso, R4 grão pastoso, R5 grão dentado e R6 maturação fisiológica (BERGAMASCHI et al., 2014).

O milho é uma planta de ciclo vegetativo variado, evidenciando desde genótipos extremamente precoces, onde a polinização pode ocorrer 30 dias após a emergência (FANCELLI e DOURADO NETO, 2000), até mesmo aqueles cujo ciclo pode alcançar 300 dias. A duração do ciclo e dos diferentes subperíodos de desenvolvimento da cultura do milho variam em função da região de cultivo, da cultivar escolhida, da época de semeadura e da disponibilidade hídrica e nutricional do solo. Deficiência hídrica ou nutricional alonga a duração do período vegetativo e reduz a do período reprodutivo.

Figura 1 – Estádios fenológicos de uma planta de milho, pela escala de Ritchie, Hanway e Benson (1993).



Fonte: <http://weedsoft.unl.edu/documents/growthstagesmodule/corn/corn.htm#>

O milho, de acordo com Doorenbos e Kassam (1994) e Bergamaschi et al. (1992) é tido como uma das mais sensíveis culturas à falta de água, sendo relativamente tolerante aos déficits hídricos durante o período vegetativo (1º período) e de maturação (4º período). A maior diminuição dos rendimentos em grãos provocada pelo déficit hídrico ocorre durante o período de floração (2º período) incluindo inflorescência, estigma e polinização devido, principalmente, à redução do número de grãos por espiga, cujo efeito é menos pronunciado quando a planta sofre de falta de água no período vegetativo precedente (1º período). A falta de água é muito prejudicial cerca de duas a três semanas antes do pendoamento até duas semanas após o espigamento. Estes eventos que ocorrem no desenvolvimento da planta, que requerem adequado suprimento de água, são vitais para se obter altos rendimentos de grãos.

Segundo Rodrigues e Silva (2011) o alto rendimento de grãos de milho resulta do sucesso em se utilizar os fatores do ambiente com máxima eficiência, minimizando as causas adversas ao desenvolvimento das culturas. Esta complexa

equação é dependente, principalmente, de três elementos meteorológicos que são a radiação solar, a temperatura do ar e a disponibilidade hídrica.

2.1.2 Necessidades climáticas da cultura

O milho pode ser cultivado em todo o território do Estado do Rio Grande do Sul. De modo geral, o regime térmico do Estado atende às exigências do milho, este responde muito bem à alta temperatura (RODRIGUES e SILVA, 2011). Na estação de crescimento de milho, o Estado apresenta alta radiação solar, e o aproveitamento ideal desta se dá quando o pré-florescimento e o enchimento de grãos da cultura coincidem com o período de mais alta radiação solar, que ocorre de meados de novembro a meados de fevereiro.

Entretanto, ocorrem variações no rendimento de grãos causadas, principalmente, pela ocorrência de baixa quantidade e irregularidade na distribuição de precipitações, causando deficiência hídrica durante o desenvolvimento da cultura (BERGAMASCHI et al., 1992; BERGAMASCHI et al., 2007; MATZENAUER et al., 1995; PARIZI et al., 2009; SOARES et al., 2010; SOLER et al., 2010), que pode ser intensa em alguns anos nos meses de final de primavera e início de verão, em particular nas regiões mais quentes.

Avila et al. (1996) citam que a probabilidade da precipitação pluvial superar a evapotranspiração potencial nos meses de dezembro a fevereiro, em praticamente todo o estado, é inferior a 60%. Este fato indica alta freqüência de ocorrência de deficiência hídrica e conseqüentemente redução no rendimento de grãos das culturas de primavera verão.

No Rio Grande do Sul, poucas vezes o milho encontra situações de cumprir todo o ciclo em condições ideais de disponibilidade hídrica. Segundo Bergamaschi et al. (2006), a maior parte do Estado apresenta fortes restrições ao cultivo do milho em decorrência do deficit hídrico, que abrange toda a metade sul e o extremo oeste do Estado. MATZENAUER et al. (2008), citam que mesmo nas regiões mais ao norte, onde se encontram as áreas consideradas preferenciais pelo zoneamento climático, as médias de precipitação não atendem às necessidades da cultura, e a ocorrência de estiagens também afeta a produção de milho, embora com menor intensidade e freqüência.

Em algumas regiões climáticas, segundo Maluf et al. (2000), como a região climática da Campanha, Baixo e Médio Vale do Uruguai, Litoral Sul, na parte sul da Serra do Sudeste e em parte da Depressão Central, durante os meses de verão, é freqüente a ocorrência de deficiência hídrica. Este déficit hídrico quando coincide com o florescimento afeta gravemente a produção de milho.

2.1.3 Necessidades hídricas da cultura e irrigação

O milho é uma espécie que consome grande quantidade de água durante o ciclo de desenvolvimento, devido ao seu elevado rendimento de massa seca e também pelo fato de tratar-se de um cereal de estação estival, ou seja, a maior demanda de água pela planta coincide com a maior demanda evaporativa da atmosfera (RODRIGUES e SILVA, 2011).

Para o Rio Grande do Sul, Matzenauer et al. (2002) detectaram que, na maioria dos anos, a precipitação pluvial não é suficiente para atender à demanda hídrica do milho, principalmente durante os períodos críticos, podendo-se esperar reduções de rendimento de grãos em quatro de cada dez safras. Por isso, torna-se imprescindível o manejo adequado da água disponível, através de uma melhor definição de práticas culturais ou através de ajustes na quantidade de água a ser aplicada por irrigação.

O consumo diário de água durante o ciclo da cultura do milho varia de 2 a 7 mm, dependendo do estágio e da demanda atmosférica. A maior exigência ocorre durante o pendoamento e espigamento (em torno de 7 mm/dia), quando a planta tem a maior área foliar (MATZENUER et al., 1998; RODRIGUES e SILVA, 2011).

Como a precipitação média mensal no estado do Rio Grande do Sul é da ordem de 100 a 150 mm, as necessidades da cultura poderiam ser supridas pelas precipitações pluviais (EMYGDIO et al., 2013). No entanto, a quantidade média de precipitação não atende às exigências da cultura nos períodos de maior consumo de água, devido a perdas por escoamento superficial, evaporação e drenagem, aliadas à baixa capacidade de retenção de água da maioria dos solos e à distribuição espacial irregular da precipitação. Além disto, o consumo de água não é uniforme durante todo o ciclo da planta.

Como resultado da variação do regime pluvial, a instabilidade na oferta dos produtos agrícolas contribui para o aumento da demanda por tecnologias que permitam maior estabilidade da produção, tal como a irrigação. Apesar do grande consumo de água, a irrigação representa a maneira mais eficiente de aumento da produção de alimentos. Radin et al. (2003) descrevem que no planejamento e manejo de sistemas de irrigação é importante conhecer a demanda hídrica da cultura e a época oportuna de irrigar, visto que ocorrem aumentos nos custos de produção e isto exige uso eficiente e racional da água.

Segundo Frizone (2007) o manejo racional da irrigação pressupõe o uso criterioso do recurso hídrico disponível para se maximizar a produtividade das culturas com o uso eficiente da água, da energia, dos fertilizantes e de outros insumos empregados na produção, considerando os aspectos sociais e ecológicos da região. Outros objetivos também podem ser estabelecidos, como maximizar a receita líquida por unidade de volume de água ou por unidade de área irrigada. Para desenvolver estratégias ótimas de irrigação, é necessário utilizar relações entre a água aplicada e a produtividade, denominadas funções de produção água-cultura (FRIZZONE, 1998).

2.2 MODELAGEM DO RENDIMENTO DE GRÃOS DE MILHO

Previsões de safra e outras estimativas envolvendo culturas agrícolas podem ser utilizadas com grande êxito em diversas situações a partir de modelos de simulação de culturas (ANDRADE JÚNIOR et al., 2006). As técnicas de modelagem tem sido usadas para descrever as relações planta-clima afim de quantificar e compreender os impactos dos riscos climáticos nos sistemas de cultivo, e para identificar novas alternativas tecnológicas para mitigar seus efeitos (BERGAMASCHI et al., 2007). Dentre as vantagens da utilização de modelos, segundo Peiter (1998), destacam-se a economia de tempo, trabalho e quantidade de recursos para planejamento e tomada de decisões de manejo no setor agrícola.

Os modelos de simulação são ferramentas que permitem gerar cenários, considerando-se as diversas combinações dos fatores que influenciam a produtividade das culturas (VIVAN et al., 2013; GOMES et al., 2014). Dessa forma, é possível avaliar as estratégias mais adequadas em cada condição, podendo-se

modificar a estratégia de irrigação para prever as alterações nos componentes de produção e de outras variáveis, como a evapotranspiração e as necessidades de água da cultura. Além disso, segundo Campos (2010), é possível, também, combinar os resultados do modelo com os fatores econômicos, para a análise de riscos associados a cada estratégia.

O conhecimento da resposta das culturas a diferentes cenários de disponibilidade hídrica e de retorno econômico pode ser alcançado com a aplicação da técnica da modelagem de desenvolvimento e crescimento das culturas, sendo possível simular diferentes condições meteorológicas e solos e, estimar a provável lâmina de água e o provável número de irrigações para qualquer época de semeadura e duração de ciclo (SILVA et al., 2011a).

2.2.1 Modelos de correlação

As funções, que relacionam a evapotranspiração, a transpiração ou volume de água aplicada ao longo do período de crescimento de uma cultura com sua produção caracterizam os modelos de correlação ou funções de produção água-cultura. Essas relações funcionais podem ser obtidos a partir de resultados experimentais (ROBAINA, 1992) e são conhecidas na literatura como funções de produção.

A utilização das funções de produção permite encontrar soluções úteis na otimização do uso da água e dos fertilizantes na agricultura ou na previsão de rendimentos culturais (FRIZZONE, 1986).

Na agricultura irrigada, o fator “água” deve ser otimizado possibilitando, sem maiores riscos, aumentar a utilização dos demais fatores de produção e, por conseqüência, obter-se maiores produtividades com uma melhor combinação dos insumos empregados (BERNARDO, 2004). Para tanto, o conhecimento das funções de produção ou superfícies de resposta é fundamental para auxiliar nas decisões, haja visto que estas funções possibilitam determinar as interações entre os diversos fatores que afetam a produtividade, e desta forma facilitar na escolha das soluções mais condizentes com a realidade regional, permitindo assim o manejo racional da irrigação em bases técnicas e econômicas.

Frizzone et al. (1987) mencionam que as variáveis da função de produção água-cultura podem ser expressas de diferentes maneiras. A variável independente água pode ser representada pela transpiração, evapotranspiração e lâmina de água aplicada durante o ciclo, entre outras. Ao usuário da irrigação é mais interessante utilizar como variável independente a lâmina de água aplicada à parcela, mesmo que apenas parte dela seja usada no processo de evapotranspiração. Em geral, a variável dependente refere-se à produtividade agrícola comercial de grãos, frutos, matéria verde ou seca, entre outras.

Por fim, as funções de produção água-cultura são particularmente importantes para as análises de produção agrícola quando a água é escassa. Para o processo de planejamento, essas funções constituem o elemento básico de decisão dos planos de desenvolvimento e, relativamente à operação de projetos de irrigação, permitem tomar decisões sobre planos ótimos de cultivo e ocupação de área para a produção econômica, com base na água disponível.

O conceito econômico de função de produção, segundo Frizzone et al. (2005), é a relação física entre as quantidades utilizadas de certo conjunto de insumos e as quantidades físicas máximas que podem ser obtidas do produto, para uma dada tecnologia conhecida.

2.3 MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS

Grande parte das técnicas de previsão numérica baseia-se na agrometeorologia. Dessa maneira, a produtividade da cultura pode ser bem caracterizada por meio de modelos matemáticos de monitoramento agrometeorológico. Esses modelos consideram que cada elemento climático exerce certo controle na produtividade, interferindo como um fator de eficiência (SOLER et al., 2010; SILVA et al., 2011b).

Fonseca et al. (2005) afirmam que os modelos agrometeorológicos visam representar de forma simplificada as relações existentes entre a resposta fisiológica das plantas e as variáveis ambientais durante os diferentes estádios fenológicos de uma cultura. A aplicação de modelos agrometeorológicos para estimativa de produtividade em uma região justifica-se pela importância da contribuição com o

aumento do conhecimento da relação entre condições agrometeorológicas e a produtividade de uma determinada cultura (SILVA, 2011).

Os modelos agrometeorológicos passaram a ser amplamente empregados na análise de risco climático, permitindo a simulação do desenvolvimento e da produção das culturas em relação às variáveis climáticas, reduzindo os dispêndios de recursos e o tempo exigido para execução das pesquisas (CAMPOS, 2010).

Araujo et al. (2011) descrevem que os modelos agrometeorológicos consideram somente a influência de fatores climáticos sobre a produtividade da cultura, funcionando como medidores de eficiência. Em determinadas condições de clima, cultivo e operação, estes modelos possibilitam a previsão de produtividades físicas da água a serem utilizadas nas análises econômicas e são particularmente importantes em análises de produção agrícola quando a água é escassa.

Assim, vários modelos de cultura vêm sendo utilizados por pesquisadores para testar a habilidade de simular eventos fenológicos, produção de biomassa e produtividade de grãos (DOURADO NETO, 1999).

As principais críticas aos modelos agrometeorológicos referem-se às suas aplicações, consideradas, muitas vezes, específicas para uma localidade, ou incompletas, no sentido de omitir efeitos de outros fatores e suas interações com a água (FRIZZONE et al., 2005).

Para o processo de cálculo, os modelos agrometeorológicos assumem o consumo relativo de água (E_{Tr}/E_{Tp}) como variável independente, e o rendimento relativo de grãos (Y_r/Y_p) como variável dependente.

Quando existe dependência entre efeitos dos déficits hídricos ocorridos em diferentes estádios fenológicos, são mais indicados os modelos multiplicativos como Jensen (1968) e, Minhas, Parikh e Srinivasan (1974). Estes autores propuseram uma função de produção na qual está presente o índice de sensibilidade ao fator hídrico (λ), que representa a sensibilidade relativa da planta ao déficit hídrico durante períodos decendiais, mensais ou estádios fenológicos (ARAUJO, 2008).

Nos casos em que o efeito do déficit entre estádios é independente, se propõe que os modelos aditivos de função de produção sejam mais apropriados (FRIZZONE et al., 2005). O modelo de Doorenbos e Kassam (1979) relaciona a perda de rendimento das culturas com o déficit hídrico através do coeficiente de

penalização da produtividade por déficit (k_y), que quantifica o efeito do estresse hídrico para o ciclo todo da cultura.

Os subitens apresentados a seguir caracterizam as principais variáveis, que estão presentes nos modelos agrometeorológicos voltados à estimativa de produtividade.

2.3.1 Evapotranspiração

É conveniente distinguir-se, preliminarmente, o conceito de evapotranspiração potencial da evapotranspiração real. A evapotranspiração potencial, ET_p , representa a quantidade de água transferida para a atmosfera, na unidade de tempo, por evaporação e transpiração de uma superfície extensa completamente coberta de vegetação de porte baixo e bem suprida de água (PEREIRA et al., 2007). Difere da evapotranspiração real, ET_r , que representa a quantidade de água transferida pelos dois processos nas condições reais, isto é, para os fatores atmosféricos e a umidade do solo realmente existentes.

A medida da evapotranspiração de uma cultura, de acordo com Allen et al. (1998), necessita de dispositivos específicos e de medidas de vários parâmetros físicos como o balanço hídrico realizados em lisímetros. Essa metodologia é cara, exigente em precisão e necessita de pessoal especializado, o que nos conduz a alternativa de estimar a evapotranspiração normalmente a partir de informações meteorológicas (temperatura, umidade relativa, vento e radiação solar ou insolação).

2.3.1.1 Estimativa da evapotranspiração máxima ou potencial

A evapotranspiração máxima de uma cultura é a transferência (perda) de água do solo para a atmosfera por evaporação e por transpiração, em qualquer fase do ciclo de crescimento e sem deficiência de água no solo. Segundo Doorenbos e Pruitt (1975), ela pode ser estimada, a partir da evapotranspiração de referência (ET_o), multiplicando esta última por um coeficiente próprio de cada cultura denominado de coeficiente de cultivo (K_c), que varia com a cultura e com o estágio de desenvolvimento em que se encontra a cultura, ou seja, $ET_p = ET_o \times k_c$.

Allen et al. (1998) relacionam o K_c e a ET_o , da mesma forma que os autores anteriormente citados, mas denominam o resultado como evapotranspiração da cultura sob condições padrão ET_c , que significa a evapotranspiração de culturas livres de doenças, bem adubadas, estabelecidas em lavouras extensas, sob ótimas condições de água no solo e alcançando a máxima produção para as condições climáticas no local onde está implantada a cultura.

2.3.1.2 Estimativa da evapotranspiração real

A evapotranspiração real das culturas agrícolas pode ser obtida através da medição dos componentes do balanço hídrico no solo ou estimada através dos métodos de contabilização da água no sistema solo-planta-atmosfera.

Os modelos de balanço hídrico relacionam as propriedades físico-hídricas do solo com os componentes de entrada e saída de água no solo, como pode ser visto na equação 1 (HILLEL, 1980 apud MARTINS, 2012). O objetivo do balanço hídrico é de se conhecer a deficiência ou excedente hídrico que afetará uma região em determinado período (THORNTHWAITE; MATHER, 1955), constituindo-se em uma ferramenta muito útil para a recomendação de cultivos agrícolas em determinada região, bem como as épocas de semeadura com os menores riscos climáticos (ANDRADE JÚNIOR et al., 2007).

$$\Delta ARM = P + I - ET - E - D \quad (\text{Eq. 1})$$

sendo ΔARM a variação do armazenamneto de água no solo, P a precipitação, I a irrigação (componentes de entrada), ET a evapotranspiração, E o escoamento superficial e D a drenagem profunda (componentes de saída).

Vários modelos hidrológicos foram desenvolvidos para descrever níveis mais complexos de interação entre a água, as camadas do solo e a vegetação, com o objetivo de representar a heterogeneidade destes processos, no entanto, um dos modelos mais conhecidos foi o proposto por Charles Warren Thornthwaite (1948) e posteriormente modificado por John Russ Mather (1955), que ficou conhecido como Balanço Hídrico de Thornthwaite e Mather, muito utilizado para fins agroclimáticos.

Este método consiste em relacionar a precipitação pluvial e a evapotranspiração, considerando-se uma determinada capacidade de armazenamento de água no solo sendo máxima quando o solo está em umidade equivalente a capacidade de campo (CC) e zero quando a umidade equivale ao ponto de murcha permanente (PMP) (DOURADO NETO e JONG VAN LIER, 1993).

Ele inclui estimativas da evapotranspiração real, déficit hídrico e excedente hídrico. Esse método considera que a taxa de retirada de água no solo varia exponencialmente enquanto que a reposição é direta, somando-se ao armazenamento de água do solo o saldo positivo do balanço entre precipitação e evapotranspiração (PEREIRA et al., 2007).

2.3.2 Estimativa do rendimento

2.3.2.1 Estimativa do rendimento potencial

Conforme descrito por Doorenbos e Kassam (1979), define-se como rendimento potencial de uma cultura aquele obtido por uma cultivar altamente produtiva e bem adaptada ao ambiente de crescimento em condições tais que não haja limitações de fatores como água, nutrientes, pragas e doenças durante todo o período de crescimento.

Dentre os modelos apresentados pela FAO para a estimativa da produtividade potencial pode-se destacar o método de Wageningen (MWa) e o método da Zona Agroecológica (MZA).

Conforme Martins (2012) que buscou uma metodologia para auxiliar no alerta contra a quebra de safra agrícola do milho e do sorgo no Nordeste do País, concluiu que apesar de não haver grandes diferenças entre os métodos de estimativa de produtividade potencial, o método de Wageningen apresentou melhores resultados na estimativa de produtividade real. Ainda, segundo este autor, é possível que o MWa tenha uma melhor representação das simulações ao considerar condições de sequeiro, isso se deve ao fato do MWA levar em consideração que a taxa de crescimento da cultura para determinado clima está relacionada com a taxa média da evapotranspiração potencial e com a média do

déficit de pressão de vapor d'água ($e_s - e_a$), medida da demanda evaporativa da atmosfera.

Sediyama et al. (2001) estudando os modelos de Stewart e Mantovani para estimativa da produtividade das culturas de milho, soja, sorgo e trigo nas localidades de Capinópolis e Montes Claros/ MG, observaram que a combinação entres os modelos de Stewart ou de Mantovani como o método da Zona Agroecológica foi o que estimou melhor a produtividade das culturas com irrigação. De um modo geral, o modelo de Stewart combinado com os métodos de Wageningen e da Zona agroecología tenderam a superestimar a produtividade das culturas nos plantios sem irrigação.

Com base nos resultados de Bonnacarrère (2007) o MZA possibilita estimar a produtividade potencial e deplecionada da cultura do milho no Rio Grande do Sul, e produz resultados coerentes com os valores citados na literatura, bem como permite definir a melhor época de semeadura.

2.3.2.2 *Estimativa do rendimento real*

O rendimento das culturas depende dos processos de fotossíntese e de respiração, processos estes que estão relacionados com o tipo de cultura, estado de nutrição, energia disponível, população de plantas, presença de plantas daninhas, ataque de insetos e doenças. Segundo Dourado Neto et al. (1999), os mesmos processos e atributos afetam a evapotranspiração real, podendo-se adotar a hipótese que o rendimento pode ser estimado a partir da evapotranspiração, de modo que o rendimento é uma função da evapotranspiração real, isto é $Y_r = f(ET_r)$. Adotando-se este raciocínio como lógico, a estimativa do rendimento real das culturas pode ser estimado por modelos agrometeorológicos.

Segundo Matzenauer et al. (1995) que buscaram entender melhor a resposta da cultura do milho ao fator hídrico, observaram que o modelo de Jensen, que utiliza como variável independente o consumo relativo de água (ET_r / ET_m), pode ser utilizado para a estimativa do rendimento de grãos da cultura do milho para diferentes localidades do Estado do Rio Grande do Sul.

O modelo de produtividade de Doorenbos e Kassam, (1979) que relaciona a perda de rendimento de culturas com o déficit hídrico é comumente utilizado para

gerar estimativas de perda de rendimento de culturas. Dentre os trabalhos utilizando este modelo pode-se citar Dourado Neto et al. (2004) que avaliaram a produtividade potencial e deplecionada de milho em função das condições climáticas e, a partir de adaptações realizadas no modelo verificaram os efeitos do clima na produtividade potencial e deplecionada da cultura de milho no Estado do Rio Grande do Sul de forma satisfatória.

No estudo de Martins (2012) foi avaliado a equação de rendimento agrícola proposta por Doorenbos e Kassam (1979) e um ajuste da equação original de Doorenbos e Kassam (1979), inserindo-se um fator deficitário afim de melhor representar as condições hídricas da região nordeste do BR. O modelo modificado apresentou uma estimativa melhor que a obtida com o modelo original em todas as análises individuais e na análise conjunta, confirmando a importância da calibração de modelos de produtividade em decorrência das condições hídricas e climáticas da região em estudo.

Andrade Junior et al. (2006) estudaram os modelos agrometeorológicos de estimativa da produtividade de Jensen, Minhas e Stewart. Estes autores concluíram que os modelos parametrizados podem ser utilizados com considerável grau de exatidão e precisão para estimar a produtividade de grãos de milho na região de Parnaíba, PI, sendo o modelo de Stewart o mais recomendável para essa condição local.

Com o objetivo de avaliar o desempenho dos modelos agrometeorológicos de Howell e Hiler; Jensen; Minhas, Parikh e Srinivasan; Doorenbos e Kassan; Stewart, Hagan e Pruitt proposto por Doorenbos e Kassan; Rao, Sarma e Chander, na estimativa da produtividade da cultura do milho, sob quatro sistemas de manejo do solo, na região de Ponta Grossa/ Paraná, Gerstemberger et al. (2010) concluíram que os modelos de “Minhas, Parikh e Srinivasan” e “Stewart, Hagan e Pruitt proposto por Doorenbos e Kassan”, utilizando coeficientes e fatores obtidos por regressão e produtividade potencial da região, proporcionaram as relações lineares mais estreitas entre as produtividades reais e estimadas.

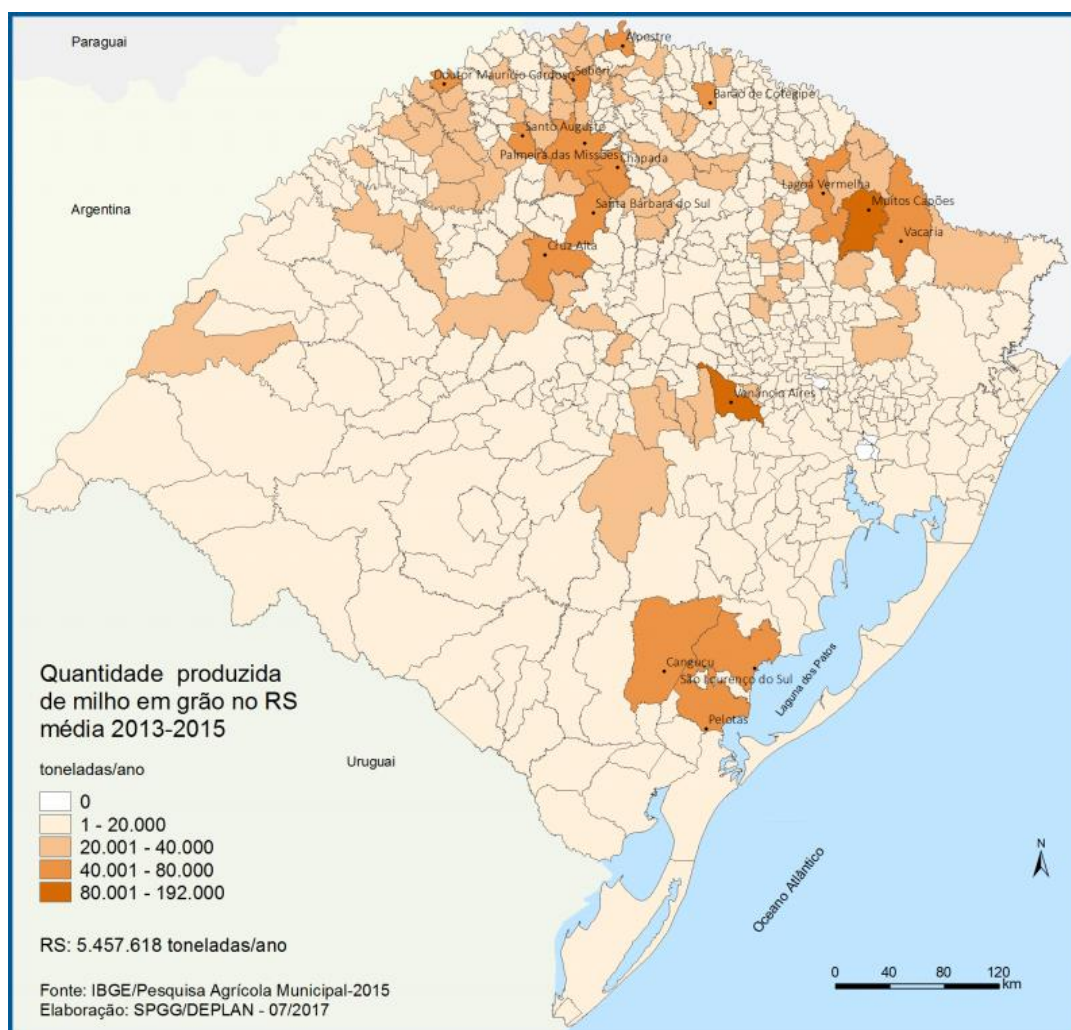
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Na sequência tratou-se das metodologias aplicadas para a resolução do trabalho e os materiais utilizados.

3.1 REGIÃO DE ESTUDO

A região de estudo corresponde a uma das áreas de produção significativa de milho no estado do Rio Grande do Sul, conforme Atlas Socioeconômico do RS (2017), apresentada na Figura 2.

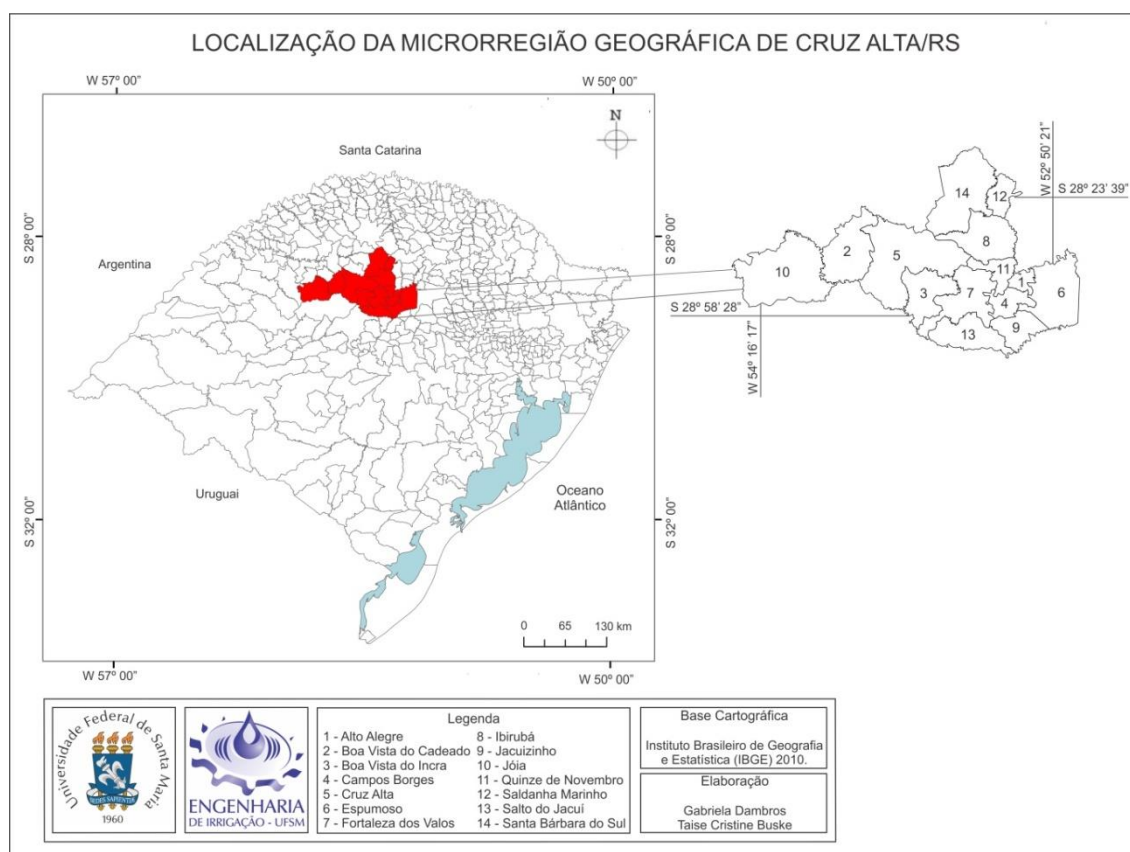
Figura 2 – Quantidades produzidas de milho em grão no período de 2013 a 2015 no RS.



Fonte: <http://www.atlassocioeconomico.rs.gov.br/milho>

O trabalho foi desenvolvido para a microrregião de Cruz Alta, como pode ser visto na Figura 3, composta de 14 municípios (Alto Alegre, Boa Vista do Cadeado, Boa Vista do Incra, Campos Borges, Cruz Alta, Espumoso, Fortaleza dos Valos, Ibirubá, Jacuizinho, Jóia, Quinze de Novembro, Saldanha Marinho, Salto do Jacuí e Santa Bárbara do Sul). Esta escolha se deve ao fato que a cultura do milho apresenta grande expressão para a movimentação da economia local, com área plantada no ano de 2015 de 27.850 ha e valor de produção de R\$ 82.532 mil, segundo dados da FEE (2017).

Figura 3 – Localização da microrregião geográfica de Cruz Alta/ RS.



Fonte: A autora.

O clima que predomina na região é o subtropical, tipo “Cfa”, temperado úmido com verão quente, de acordo com a classificação climática de Köppen (KUINCHTNER et al., 2001). O mês mais quente do ano é janeiro, com a máxima de 30°C, e, em julho ocorre o maior frio, com a mínima normal de 8,6°C, e a precipitação atinge o total de 1.727 mm segundo Secco et al. (2005).

3.2 DADOS METEOROLÓGICOS

Foram utilizados dados diários, no período de 22 anos (1993-2014), oriundos da estação meteorológica localizada no município de Cruz Alta, com 28,63° de latitude sul, 53,6° de longitude oeste e 472,5m de altitude, pertencente à rede do 8º Distrito de Meteorologia/ Instituto Nacional de Meteorologia (8º DISME/INMET).

Os dados meteorológicos utilizados foram as temperaturas do ar máxima e mínima (°C), a umidade relativa do ar (%), a velocidade do vento (m s^{-1}), o número de horas de luz do sol ou insolação (h) e a precipitação pluviométrica (mm).

A organização dos dados meteorológicos e o preenchimento de falhas existentes nos registros foi realizado através do programa computacional CLIMA – Computação Lógica de Informação para Monitoramento Agroclimático (FARIA et al., 2002). A correção dos registros críticos foi realizada através da opção “média histórica”, que calcula pela média dos valores ocorridos na mesma data da falha ao longo dos anos.

3.3 DADOS DA CULTURA

Os dados de produtividade do milho para a referida microrregião e o período de estudo foram obtidos no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no canal da Produção Agrícola Municipal (PAM) que fornece séries históricas e estatísticas.

A partir da safra 2009/10, para efeito de simulação, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento classifica as cultivares em três grupos de características homogêneas: Grupo I ($n < 110$ dias); Grupo II ($n \geq 110$ dias e ≤ 145 dias); e Grupo III ($n > 145$ dias), onde n expressa o número de dias da emergência à maturação fisiológica (EMBRAPA, 2017).

Diante das vastas opções de híbridos e ciclos de cultivo, foi escolhido um híbrido pertencente ao grupo II, de ciclo de 125 dias para aplicação dos dados, dividido em 20 dias de fase inicial (K_c inicial), 35 dias do desenvolvimento vegetativo até o pendoamento para atingir o K_c médio, por 40 dias entre pendoamento e enchimento de grão e 30 dias de maturação (KÖPP et al., 2015).

Ainda, de acordo com o zoneamento agrícola de risco climático para a cultura do milho no estado do Rio Grande do Sul, foram simuladas as combinações para o plantio em setembro, outubro, novembro e dezembro.

3.4 MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS

Foram adotados três modelos agrometeorológicos, apresentados na Tabela 1, para estimar a produtividade real da cultura do milho, sendo todos com variável independente ETr / ETp e variável dependente Yr / Yp .

Tabela 1 – Modelos agrometeorológicos com seus respectivos: autores, equações e parâmetros.

Autores	Equações	Parâmetros
Jensen (1968)	$\frac{Yr}{Yp} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ETr}{ETp} \right)^{\lambda_i}$	λ_i
Minhas, Parikh e Srinivasan (1974)	$\frac{Yr}{Yp} = \prod_{i=1}^n \left[1 - \left(1 - \frac{ETr}{ETp} \right)^2 \right]^{\lambda_i}$	λ_i
Doorenbos e Kassan (1979)	$\frac{Yr}{Yp} = 1 - \left[ky \left(1 - \frac{ETr}{ETp} \right) \right]$	Ky

sendo Yr é o rendimento real (Kg ha^{-1}), Yp o rendimento potencial (Kg ha^{-1}), ETr a evapotranspiração real (mm), ETp a evapotranspiração potencial (mm), λ_i é o fator hídrico de penalização da produtividade por déficit (adimensional), Ky o coeficiente de penalização da produtividade por déficit (adimensional), i é referente às fases do ciclo fenológico ($i = 1, 2, 3$ e 4) e n é o número de estádios fenológicos ($n = 4$).

A relação ETr / ETp é conhecida como índice de satisfação de necessidade de água (ISNA), que varia de 0 (zero) a 1 (um), indicando períodos de suprimento ou não da água demandada pela cultura. São consideradas regiões favoráveis (de menor risco) aquelas que apresentam valores de ISNA iguais ou superiores a 0,55, intermediária (médio risco) entre 0,55 e 0,45 e, desfavoráveis (alto risco) valores inferiores a 0,45, segundo Rodrigues e Silva (2011).

3.4.1 Parâmetros dos modelos

Após buscas na bibliografia, foram usados, inicialmente, os valores do parâmetro λ_i para o modelo de Jensen (1968), os mesmos calibrados por Matzenauer et al. (1995), apresentados na Tabela 2, para Santo Augusto/RS em 4 períodos de desenvolvimento da cultura.

Para o modelo de Minhas, Parikh e Srinivasan (1974) foram adotados os coeficientes de 0,1496, 0,2060, 0,3650 e 0,1116 conforme o estágio fenológico I, II, III e IV, idênticos aos valores apresentados por Gerstemberger et al. (2010).

Para executar o modelo de Doorenbos e Kassan (1979) empregou-se o k_y de 1,25 para todo ciclo, conforme Allen et al. (1998), visto que o Boletim da FAO é uma importante fonte de consulta.

Tabela 2 – Fator hídrico de penalização da produtividade por déficit para o modelo de Jensen (1968), para os grupos de maturação de milho precoce e normal.

Período de desenvolvimento		Grupo de maturação	
		Precoce	Normal
1 – emergência a 30 dias após a emergência (EM-30EM)	λ_1	-0,5819	-0,8284
2 – 30 dias após a emergência ao início do pendoamento (30EM-IP)	λ_2	0,3210	0,4235
3 – início do pendoamento a 30 dias após (IP-30 IP)	λ_3	0,7420	0,8048
4 – 30 dias após IP à maturação fisiológica (30 IP-MF)	λ_4	0,2575	0,2156

3.4.2 Evapotranspiração potencial (ETp)

Os modelos de cálculo da produtividade real consideram que a evapotranspiração potencial é função da evapotranspiração de referência e utiliza uma correção feita pelo coeficiente da cultura (K_c), o qual é específico para cada fase do ciclo fenológico da cultura do milho conforme Equação 2.

$$ET_p = ET_o \times K_c \quad (\text{Eq. 2})$$

A evapotranspiração de referência foi estimada pelo método de Penman-Montheit (Equação 3) por meio do *software* ETo Calculator Version 3.1 (FAO, 2009), o qual necessita dos dados de temperatura máxima e mínima, umidade relativa, velocidade do vento e insolação.

$$ET_o = \frac{0,408 \times \Delta \times (R_n - G) \times \gamma \times \frac{900}{(T + 273)} \times U_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0,34 \times U_2)} \quad (\text{Eq. 3})$$

sendo ETo a evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹), Δ a declinação da curva de pressão de saturação (kPa °C⁻¹), Rn o saldo de radiação à superfície (MJ m⁻² dia⁻¹), G o fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹), γ a constante psicrométrica do ar (kPa °C⁻¹), T a temperatura média do ar a 2,00 m de altura (°C), U₂ a velocidade do vento a 2,00 m de altura (m s⁻¹), e_s a pressão de saturação de vapor (kPa) e e_a a pressão de vapor atual do ar (kPa).

3.4.3 Evapotranspiração real (ETr)

Para estimativa da evapotranspiração real foi utilizado o método do balanço hídrico segundo Thornthwaite e Mather (1955), empregando-se o *software* *System for Water Balance* – SYSWAB, desenvolvido por Gaspar et al. (2015). Na Figura 4 apresenta-se além da tela principal deste *software*, a janela de cálculo do balanço hídrico.

Esse método considera que a taxa de retirada de água no solo (Equação 4) varia exponencialmente enquanto que a reposição (Equação 5) é direta, somando-se ao armazenamento de água do solo o saldo positivo do balanço entre precipitação e evapotranspiração [(P – ET)⁺].

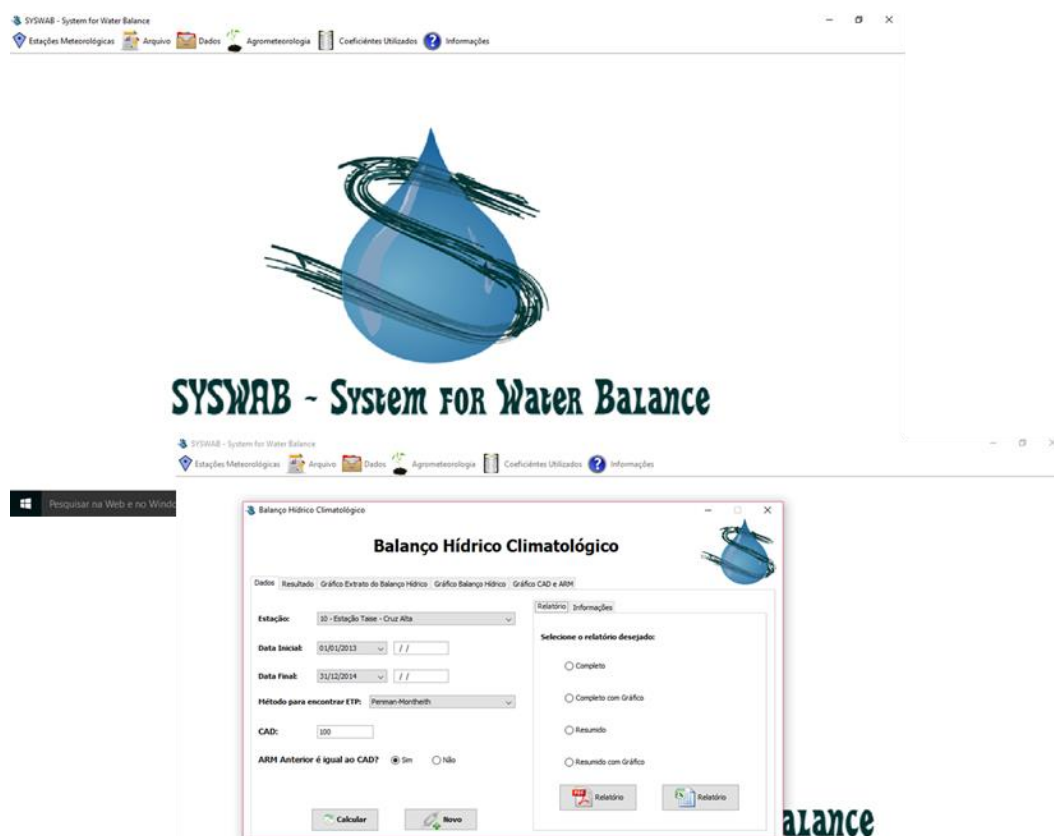
$$ARM = CAD \times e^{-\frac{|Nac|}{CAD}} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$Nac = CAD \times \ln \frac{ARM}{CAD} \quad (\text{Eq. 5})$$

sendo ARM a variação de armazenamento de água no solo, CAD a capacidade de água disponível no solo e Nac o negativo acumulada.

O referido *software* usa como dados de entrada a precipitação pluvial, a temperatura e a radiação no período de desenvolvimento da cultura, considerando-se uma determinada capacidade de armazenamento de água no solo, ainda inclui estimativas da evapotranspiração, déficit hídrico e excedente hídrico. Este é uma ferramenta que gerencia e transforma dados em informações auxiliando no monitoramento climático e tomada de decisões.

Figura 4 – Tela principal do SYSWAB e janela de cálculo do balanço hídrico.



3.4.4 Rendimento potencial (Y_p)

O rendimento potencial pode ser calculado para diferentes condições climáticas permitindo identificar áreas mais propícias à produção de cada cultura. Neste trabalho foram comparados os métodos de Wageningen (MWA) e o da Zona Agroecológica (MZA), ambos recomendados pela FAO e citados em Doorenbos e Kassam (1979).

O rendimento máximo ou potencial obtido pelo método MWA é função de parâmetros que dependem da cultura, da temperatura, da eficiência respiratória, da relação entre a parte colhida e a produtividade final, e do clima (Equação 6).

$$Yp = K \times cH \times cT \times P \times Yo \times \frac{ETm}{e_a - e_d} \quad (\text{Eq. 6})$$

sendo K a correção para o tipo de cultura, cH a correção para a parte colhida, cT a correção para a temperatura, todos adimensionais, P o período total do ciclo (dias), Yo a produtividade de matéria seca total da cultura padrão ($\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$), $[ETm / (e_a - e_d)]$ a correção para efeito do clima.

O valor de K para a cultura do milho é 1,90. O índice de colheita (cH) representa a razão entre a produtividade obtida e a matéria seca total. Isso porque, em geral, apenas uma parte da matéria seca total é colhida. Este valor para a cultura do milho é de 0,40 a 0,50 (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

A correção para temperatura é feita para se obter a produção de matéria seca, levando-se em conta que, para os processos de crescimento e manutenção (respiração), a planta utiliza 40% da energia total requerida. Isso, pois o cálculo feito para a produção de matéria seca da cultura padrão é calculada inicialmente para condições padrão de temperatura.

Assim, considerando-se a temperatura média diária do ciclo, aplica-se a correção da temperatura específica para a cultura. A Tabela 3 apresenta os valores de cT em função da temperatura média diária do ciclo de crescimento da cultura do milho (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

Tabela 3 - Coeficientes de correção de temperatura para a cultura de milho.

Cultura	Temperatura média diária do ciclo ($^{\circ}\text{C}$)						
	5	10	15	20	25	30	35
Milho	0	0,10	0,35	0,5	0,6	0,6	0,6

A produção de matéria seca total de uma cultura padrão (Yo) é calculada, conforme Equação 7, por meio do método de De Wit (1965, citado por Doorenbos e

Kassam, 1979), o qual se baseia no nível de radiação de ondas curtas recebidas em condições padrão.

$$Y_o = F \times y_o + (1 - F) \times y_c \quad (\text{Eq. 7})$$

sendo Y_o a produção de matéria seca bruta para a cultura padrão em $\text{Kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$; F a fração do dia em que o céu encontra-se nublado, adimensional, y_o é a taxa de produção de matéria seca bruta para uma localidade nublada e cultura padrão em $\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ e y_c a taxa de produção de matéria seca bruta para uma localidade com céu limpo e para cultura padrão em $\text{Kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$.

O valor de F (Equação 8) representa a fração do período diurno em que o sol fica encoberto por nuvens e é calculado pela equação:

$$F = \frac{R_{se} - 0,5 R_s}{0,8 R_{se}} \quad (\text{Eq. 8})$$

sendo R_{se} a máxima radiação solar de onda curta ativa em dias de céu limpo em $\text{cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e R_s é a radiação solar de onda curta em $\text{cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

Os valores para R_{se} , y_c e y_o são função da latitude de cada localidade e dos meses do ano nos quais se concentra o ciclo. Foi utilizada uma média aritmética para os valores correspondentes aos meses nos quais o ciclo se concentrou e também uma interpolação linear para as latitudes (Tabela 4).

Tabela 4 - Máxima radiação solar de onda curta ativa (R_{se} em $\text{cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$) e taxa de produção de matéria seca bruta para uma localidade com céu limpo (y_c em $\text{Kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$) e taxa de produção de matéria seca bruta para uma localidade nublada e cultura padrão (y_o em $\text{Kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$).

H. Sul	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
	Rse	399	386	357	313	264	238	249	293	337	375	394	400
20°	y_c	465	451	425	387	348	325	334	371	407	439	460	468
	y_o	249	242	226	203	178	164	170	193	215	235	246	250
	Rse	411	384	333	270	210	179	191	245	303	363	400	417
30°	y_c	483	456	412	356	299	269	281	333	385	437	471	489
	y_o	258	243	216	182	148	130	137	168	200	232	251	261

Segundo Bierhuizen e Slatyer (1965, citados por Doorenbos e Kassam, 1979), a correção para efeito do clima $[ET_m / (ea-ed)]$ é feita, pois a taxa de crescimento da cultura para determinado clima está relacionada com a taxa média da evapotranspiração potencial - ET_m , com a média do déficit de pressão de vapor d'água $(ea-ed)$ além da radiação solar, durante todo período de crescimento.

O método MZA foi desenvolvido para estimar o rendimento máximo em dimensões continentais; no entanto, ele também pode ser aplicado para localidades específicas. O rendimento potencial pode ser estimado pela Equação 9:

$$Y_p = cL \times cN \times cH \times P \times [F \times (a + b \times y_m) \times y_o + (1 - F) \times (c + d \times y_m) \times y_c] \quad (\text{Eq. 9})$$

sendo cL a correção em função do desenvolvimento da cultura e área foliar, cH é correção para a parte colhida, cN a correção para a produção de matéria seca em função da temperatura, F a parte do dia em que o céu está nublado, todos adimensionais, y_m a taxa de produção de matéria seca de folhas ($\text{kg ha}^{-1} \text{h}^{-1}$) e os valores de a , b , c e d são função da taxa de produção de matéria seca. Assim para:

$y_m < 20 \text{ kg ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ o valor de $a = 0.5$, $b = 0.025$, $c = 0$ e $d = 0.05$

$y_m > 20 \text{ kg ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ o valor de $a = 0.8$, $b = 0.01$, $c = 0.5$ e $d = 0.025$

A correção em função do desenvolvimento da cultura e área foliar (cL) se fundamenta na suposição de que a cultura padrão possui área foliar ativa equivalente a 5 vezes a área do terreno, isto é, índice de área foliar $IAF = 5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (DOORENBOS e KASSAM, 1979). Para culturas com IAF maior que $5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, como utilizado neste trabalho (BONNECARRÈRE, 2007), considera-se o $cL = 0,5$.

Para manter a produção de matéria seca, é necessário que a planta mantenha seus processos de crescimento ou também processos respiratórios. A energia requerida pela planta para continuar se desenvolvendo é representada pelo índice de correção para matéria seca (cN), o qual é função da temperatura. Portanto, se $T < 20^\circ\text{C}$ o $cN = 0,60$, quando $T \geq 20^\circ\text{C}$ o $cN = 0,50$.

O índice de colheita (cH), que representa a razão entre a produtividade obtida e a matéria seca total varia de 0,35 a 0,45 para o milho (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

A taxa de produção de matéria seca de folhas (y_m) da cultura padrão é de 20 kg ha⁻¹ h⁻¹. No entanto, a produção da matéria seca é função da cultura e da temperatura. Assim, o valor de y_m em função da temperatura está apresentado na Tabela 5 para a cultura do milho.

Tabela 5 - Taxa de produção de matéria seca (y_m) em função da temperatura.

Cultura	Temperatura média diária do ciclo (°C)								
	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Milho	0	0	5	45	65	65	65	45	5

3.4.5 Rendimento real (Yr)

O valor de rendimento real foi considerado o rendimento obtido em cada ciclo/ano, conforme as combinações dos modelos de estimativa da produtividade potencial e dos modelos agrometeorológicos. Estas análises foram realizadas com o auxílio de uma planilha eletrônica.

A precisão da estimativa de cada modelo agrometeorológico foi determinada a partir de análise de regressão linear e correlação, realizada entre os valores anuais de produtividade real (observado na microrregião de Cruz Alta/ RS) e estimada com os referidos modelos.

3.5 AJUSTES DOS PARÂMETROS

Com o intuito de verificar possíveis melhorias na estimativa das produtividades, obtidas com os modelos agrometeorológicos, também foi realizado um ajuste dos parâmetros λ_i e k_y , utilizando o *software* SigmaPlot 11.0.

Posteriormente, foram utilizados valores de λ_i provenientes do ajustamento em análise de regressão múltipla, a partir das transformadas logarítmicas da equação e método dos mínimos quadrados, para os modelos de Jensen (1968) e

Minhas, Parikh e Srinivasan (1974). Para o parâmetro k_y , referente ao modelo de Doorenbos e Kassan (1979), foram usados valores oriundos de um ajuste envolvendo regressão simples, conforme descrito por Araujo (2008).

3.6 AVALIAÇÕES ESTATÍSTICAS

A análise entre os dados estimados pelos modelos e os dados observados foi feita considerando-se alguns dos coeficientes mais utilizados na literatura em análise de estimativas de produtividade agrícola:

1) Coeficiente de correlação de Pearson (r) - é um indicador estatístico de precisão que permite quantificar o grau de associação entre as duas variáveis envolvidas na análise, sendo seu campo de variação entre -1 e 1 e quanto maior o seu valor absoluto maior o grau de associação entre os valores observados e os valores estimados (LIRA e NETO, 2006), visto na Equação 10.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E}) \times (O_i - \bar{O})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2][\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2]}} \quad (\text{Eq. 10})$$

sendo E_i são os valores estimados, O_i os valores observados, \bar{E} a média dos valores estimados e \bar{O} a média dos valores observados.

2) Coeficiente de determinação (r^2) - é uma medida do poder explicativo do modelo utilizado. Dá a proporção da variação da variável dependente (Y), que é explicada em termos lineares pela variável independente. É o quadrado do coeficiente de correlação e quanto mais próximo da unidade melhor o ajuste.

3) Índice de concordância (d), fornece o grau de exatidão entre as variáveis envolvidas, uma vez que está relacionado à diferença entre os valores estimados em relação aos valores observados, Equação 11, sendo seu campo de variação de 0 (nenhuma concordância) a 1 concordância perfeita (WILLMOTT et al., 1985).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{E}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (\text{Eq.11})$$

sendo E_i são os valores estimados, O_i os valores observados, \bar{E} é a média dos valores estimados e \bar{O} a média dos valores observados.

4) Índice de desempenho ou confiança (c), segundo Camargo e Sentelhas (1997), avalia conjuntamente a exatidão (d) e a precisão (r) das estimativas, sendo calculado pela Equação 12.

$$c = r \times d \quad (\text{Eq. 12})$$

O índice c tem a finalidade de avaliar o desempenho do método proposto, considerando as seguintes classes de interpretação (Tabela 6).

Tabela 6 – Critério de interpretação do desempenho dos métodos pelo índice c.

Valores de c	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,75 a 0,85	Muito Bom
0,65 a 0,75	Bom
0,60 a 0,65	Mediano
0,50 a 0,60	Sofrível
0,40 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

3.7 QUEBRA DE RENDIMENTO

Foram simuladas as quebras de rendimento (Q, em %), dado pela equação 13, para cada um dos anos avaliados, as quais foram convertidas em frequência relativa para análise dos resultados.

$$Q = \left(1 - \frac{Y_r}{Y_p}\right) * 100 \quad (\text{Eq. 13})$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

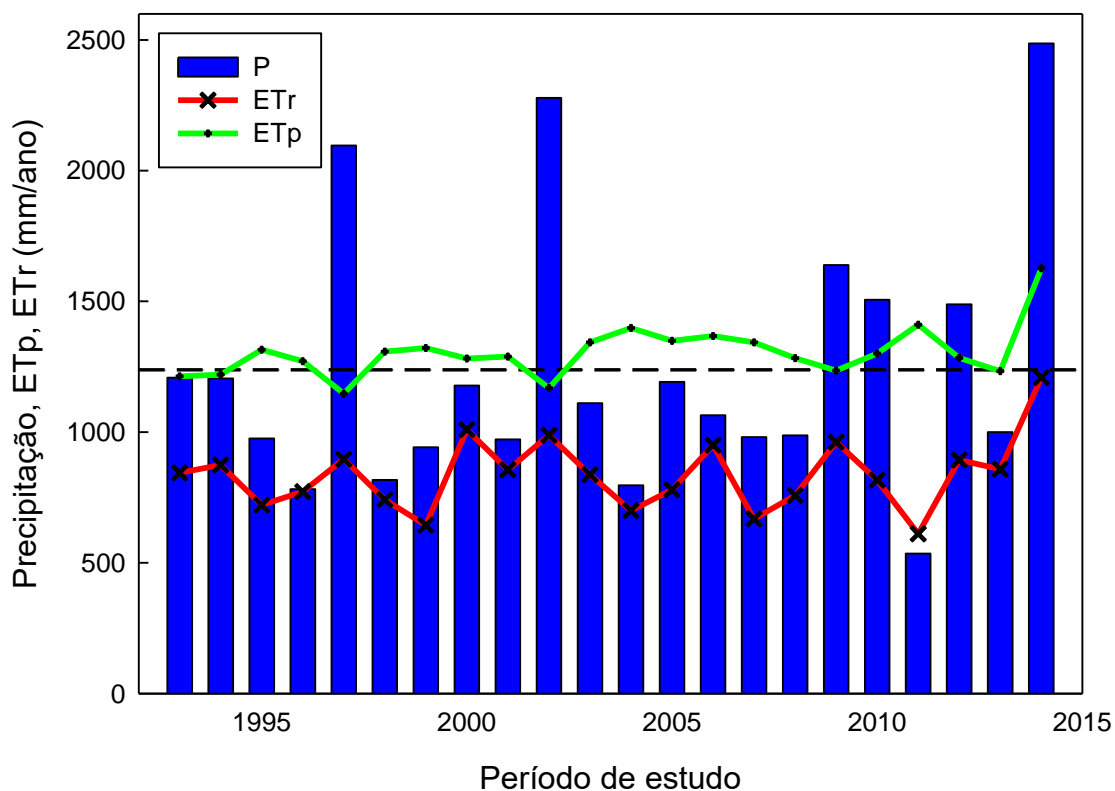
Em seguida apresentaram-se os resultados obtidos nas diversas análises, de modo a verificar a validade da metodologia proposta neste estudo.

4.1 ANÁLISE DO BALANÇO HÍDRICO

Para o período estudado, que compreende a primavera-verão, a média de precipitação observada foi de 1238 mm. Dos 22 anos observados neste trabalho, somente seis deles apresentaram acumulados acima da média climatológica, como pode ser visto na Figura 5.

Dentre os anos com os menores acumulados precipitados na primavera-verão (setembro a março) merecem destaque: 1996, 1998, 2004 e 2011 com 781,7 mm, 816,9 mm, 796,4 mm e 535,7 mm, respectivamente.

Figura 5 - Balanço hídrico do período de estudo para a cultura do milho na microrregião de Cruz Alta/ RS, CAD 100 mm.



Outro apontamento interessante diz respeito à continuidade do baixo acumulado de precipitação, que ficou mais explícito nos anos de 1995 e 1996, depois 1998, 1999 e 2001, e ainda 2007, 2008. Isto pode implicar em baixa reposição dos mananciais de água sujeitando a futura sustentação do plantio.

Auxiliando o balanço hídrico tem-se o índice de satisfação de necessidade de água, que indica a quantidade de água que a planta consome em relação à quantidade máxima de água que a planta consumiria. Na Tabela 7 podem ser vistos os ISNA obtidos nesse estudo.

Tabela 7 – Índice de Satisfação de Necessidade de Água (ISNA) para a cultura do milho na microrregião de Cruz Alta/ RS.

Anos	ETr (mm) acumulada	ETp (mm) acumulada	ISNA
1993	844,1	1213,4	0,70
1994	874,0	1219,7	0,72
1995	720,7	1315,4	0,55
1996	772,4	1271,3	0,61
1997	896,2	1147,0	0,78
1998	741,5	1308,4	0,57
1999	644,2	1321,9	0,49
2000	1009,6	1281,9	0,79
2001	856,0	1289,3	0,66
2002	988,0	1168,7	0,85
2003	837,5	1343,4	0,62
2004	699,8	1398,1	0,50
2005	780,1	1349,2	0,58
2006	950,2	1367,8	0,69
2007	668,2	1343,4	0,50
2008	757,8	1283,4	0,59
2009	961,5	1235,4	0,78
2010	816,4	1300,8	0,63
2011	610,6	1410,7	0,43
2012	893,6	1283,7	0,70
2013	858,4	1233,5	0,70
2014	1208,9	1626,9	0,74

Considerando os valores acumulados deste índice pode-se observar que os resultados do ISNA variaram de 0,43 até um máximo de 0,85, indicando safras com moderado risco climático. Os anos de 1995, 1999, 2004, 2007 e em especial 2011

apresentam os menores valores de ISNA, demonstrando que a variação entre a quantidade de água consumida e demandada é alta para a produção máxima.

Aguiar (2005) ressalta que o setor agropecuário tem sido fortemente impactado pelas estiagens que, em grande medida, explicam os maus resultados de algumas safras, como no caso dos anos de 2004 e 2005, quando a agropecuária gaúcha se confrontou com quatro meses de deficiência hídrica.

Segundo ANA (2012) verificou-se em vários municípios do Rio Grande do Sul a ocorrência de chuvas abaixo do padrão, levando à decretação de situação de calamidade pública por seca, em janeiro de 2011 e entre novembro e dezembro de 2011.

Em estudos do balanço hídrico para o município de Cruz Alta/ RS, Buske et al. (2015) e Buske et al. (2016) concluíram que ocorre deficiência em todos os anos estudados na primavera-verão, período onde se dá a produção de grãos nesta mesorregião. Além disto, mesmo durante os meses mais chuvosos do ano houve deficiência hídrica devido à distribuição irregular das precipitações.

Da mesma forma Avila et al. (1996) observaram que nos meses mais críticos para as culturas de primavera-verão em relação à água (dezembro, janeiro e fevereiro) a probabilidade da precipitação pluvial superar a ETp é menor do que 60% em grande parte do Estado, incluindo as principais regiões produtoras de grãos, enfatizando a necessidade de planejamento quanto à épocas de semeadura das culturas de primavera-verão e, também, quanto à utilização de técnicas de irrigação. Concordando com os autores, no presente estudo verificou-se que em apenas 27% das observações a precipitação superou a evapotranspiração potencial.

Também Bergamaschi et al. (2007) observaram altas relações entre rendimento de milho e chuvas no Rio Grande do Sul, em especial no período reprodutivo. O impacto da variabilidade da precipitação no rendimento do milho durante períodos críticos breves do ciclo da cultura foi detectado até mesmo em grandes escalas de agregação, como região ou estado. Em outro estudo Bergamaschi et al. (2006) verificaram que a maior redução na produção ocorre em consequência do déficit hídrico no florescimento, numa relação quadrática. Nesse período, a razão ET_r / ET_m explica quase 80% das variações na produção de grãos, que se estabiliza acima de uma razão de 0,7.

Fontana e Berlato (1996) concluíram que a variabilidade da precipitação no Rio Grande do Sul está relacionada ao fenômeno ENOS (El Niño Oscilação do Sul) e que essa variabilidade tem influência sobre a variabilidade do rendimento do milho no Estado. Matzenauer et al. (2008) avaliando os efeitos do fenômeno ENOS sobre a evapotranspiração de referência na região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul, detectaram que nos meses de outubro, novembro e dezembro, os valores mais elevados de ETo ocorreram em eventos de La Niña; já no período de janeiro a março, a ETo foi maior em anos neutros, para Cruz Alta.

Assim sendo, é preciso considerar a ocorrência e previsão de eventos climáticos nas estimativas de safras agrícolas, a fim de se utilizar estas informações para subsidiar a interpretação e obtenção de resultados consistentes com a realidade de cada região.

4.2 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE POTENCIAL

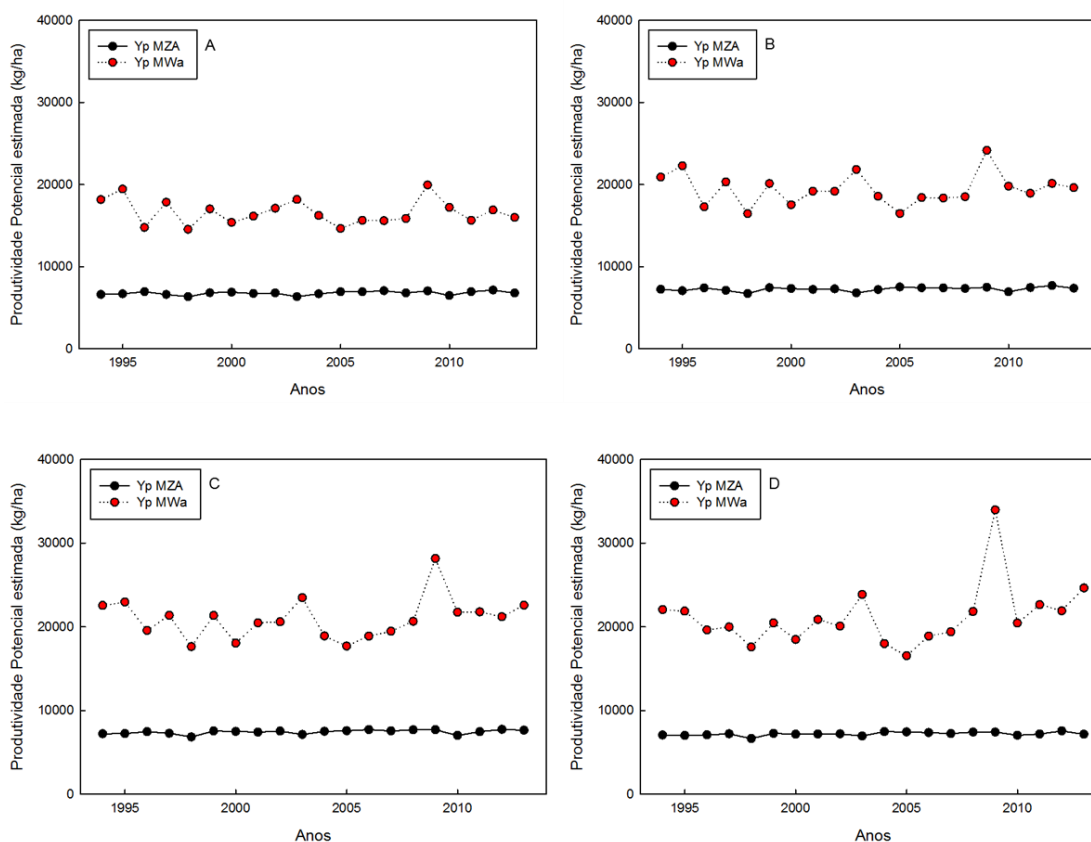
A partir dos dados de produtividade potencial, obtidos pelos métodos MZA e MWa, foi possível analisar as estimativas de produtividade real. As Figuras 6 e 7 mostram as estimativas de produtividade potencial e real, respectivamente, a partir dos dois métodos estudados, para o período de 20 anos de dados avaliados de plantio do milho na microrregião de Cruz Alta/ RS.

Comparando-se as estimativas de produtividade potencial da cultura do milho por ambos os métodos, nota-se que o método MWa tende a superestimar a produtividade potencial que, por sua vez, acarreta em uma superestimativa da produtividade real, levando a uma interpretação equivocada da queda de produtividade.

Apesar de haver diferenças entre os métodos de estimativa de produtividade potencial, o método MZA acompanhou melhor as flutuações dos resultados na estimativa de produtividade real.

Como ambos utilizam variáveis diferentes na predição do rendimento potencial, é comum haver uma diferenciação nos resultados. O método mais adequado deve ser aquele que melhor identifique as condições climáticas da região em estudo, segundo Martins (2012).

Figura 6 - Comparação entre os métodos MZA e MWa de estimativa de produtividade potencial da cultura do milho para plantio em setembro (A), outubro (B), novembro (C) e dezembro (D) na região de Cruz Alta/ RS.



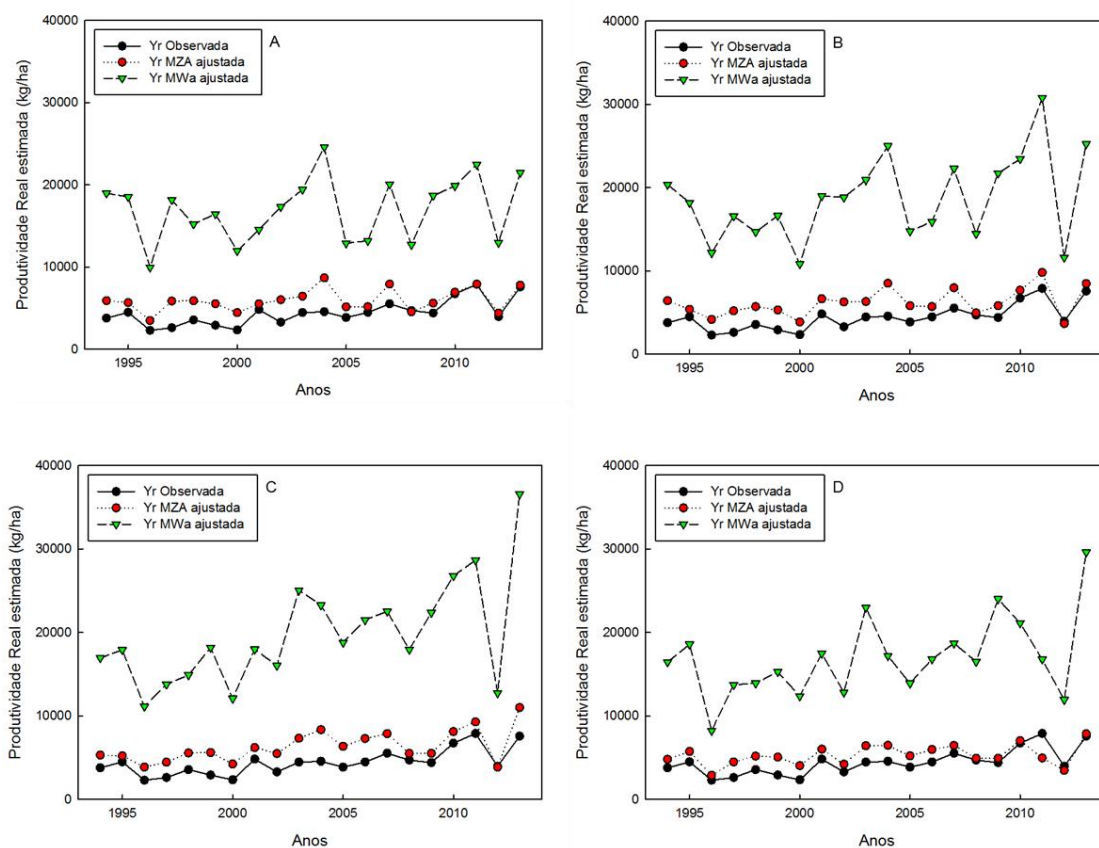
Diferente do observado neste trabalho, Martins (2012) adotou o modelo MWa por ter uma melhor representação das simulações ao considerar condições de sequeiro, pois leva em consideração que a taxa de crescimento da cultura para determinado clima está relacionada com a taxa média da evapotranspiração potencial e com a média do déficit de pressão de vapor d'água ($e_a - e_d$), medida da demanda evaporativa da atmosfera, relações estas não contabilizadas pelo MZA.

Sediyama et al. (2001), também comparando os métodos MWa e MZA com o intuito de verificar a melhor resposta ao prever produtividade de milho, soja, sorgo e trigo nos municípios de Capinópolis e Montes Claros, ambos em Minas Gerais, concluíram que de maneira geral o modelo MZA tende a representar melhor as estimativas de produtividade máxima. A combinação entre os modelos de Stewart ou de Mantovani com MZA foi o que estimou melhor a produtividade das culturas com irrigação. E de um modo geral, o modelo de Stewart combinado com os métodos de

Wageningen e da Zona Agroecol3gia, tendeu a superestimar a produtividade das culturas nos plantios sem irriga33o.

Para Bonnacarr3re (2007) o MZA possibilita estimar a produtividade potencial e deplecionada da cultura do milho no Rio Grande do Sul, e produz resultados coerentes com os valores citados na literatura, bem como permite identificar a melhor 3poca de semeadura.

Figura 7 - Compara33o entre os m3todos MZA e MWa de estimativa de produtividade real da cultura do milho atrav3s do modelo de Jensen (1968) para plantio em setembro (A), outubro (B), novembro (C) e dezembro (D) na regi3o de Cruz Alta, RS.



Portanto, justifica-se a utiliza33o do MZA neste trabalho por n3o haver na literatura justificativa para a escolha de um ou outro m3todo, e ainda, pelo fato da compara33o entre os dois m3todos indicar melhores estimativas de produtividade real com o MZA.

4.3 DESEMPENHO DOS MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS NA ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE REAL

No princípio deste estudo foram analisados os modelos agrometeorológicos com os parâmetros recomendados na bibliografia, apresentados no item 3.4.1 dos materiais e métodos.

4.3.1 Análise de regressão linear entre produtividade real observada e estimada, com parâmetros recomendados na literatura

De maneira geral, os modelos agrometeorológicos testados nas diferentes combinações não apresentaram coeficiente de determinação satisfatório, como pode ser visto na Tabela 8, na qual também são apresentados os coeficientes linear e angular da reta.

Os melhores coeficientes de determinação foram encontrados com o modelo de Jensen para o plantio em novembro, sendo eles 0,407 e 0,401 quando empregado o MZA e o MWa para determinação da produtividade potencial, respectivamente. Seguidos por “ r^2 ” = 0,338 quando combinado o modelo de Jensen com MZA, e “ r^2 ” = 0,316 quando testado Minhas, Parikh e Srinivasan com MZA, ambos para o plantio em outubro.

Quanto ao modelo de Doorenbos e Kassan cabe observar que todas as combinações apresentaram coeficiente de determinação variando de 0,120 até 0,217, valores esses considerados baixos. Quanto mais próximo de zero significa que a variável dependente (Y_r Observada) é pouco explicada em termos lineares pela variável independente.

Desta primeira análise pode-se inferir que as melhores épocas de plantio foram outubro e novembro. Nas Figuras 8 e 9 são apresentadas as análises de regressão linear entre os valores de produtividade observada e estimada pelos três modelos agrometeorológicos testados para plantio em outubro e novembro, nessa ordem. Pode-se verificar nestas épocas de plantio coeficiente angular maior que zero, aliado a significância no teste t garantindo correlação positiva, única exceção para o método de Doorenbos e Kassan, em novembro, onde o teste t é não significativo.

Tabela 8 – Valores dos coeficientes linear e angular da reta e seu respectivo coeficiente de determinação para os modelos de: (A) Jensen (1968); (B) Minhas, Parikh e Srinivasan (1974); (C) Doorenbos e Kassan (1979), com parâmetros recomendados na literatura.

	Modelo	Equação	r ²
Set	A - MZA	$Y = 3467,435 + 0,201 * X$	0,028
	A - MWa	$Y = 3806,464 + 0,052 * X$	0,016
	B - MZA	$Y = -7413,275 + 1,939 * X$	0,229
	B - MWa	$Y = 2095,126 + 0,155 * X$	0,040
	C - MZA	$Y = 1113,156 + 0,816 * X$	0,217
	C - MWa	$Y = 2450,377 + 0,196 * X$	0,120
Out	A - MZA	$Y = 1617,275 + 0,698 * X$	0,338
	A - MWa	$Y = 2148,865 + 0,210 * X$	0,279
	B - MZA	$Y = -3903,787 + 1,343 * X$	0,316
	B - MWa	$Y = 717,995 + 0,223 * X$	0,162
	C - MZA	$Y = 1814,010 + 0,665 * X$	0,199
	C - MWa	$Y = 2556,136 + 0,176 * X$	0,152
Nov	A - MZA	$Y = 1320,191 + 0,720 * X$	0,407
	A - MWa	$Y = 1746,340 + 0,218 * X$	0,401
	B - MZA	$Y = -2469,153 + 1,129 * X$	0,255
	B - MWa	$Y = 776,534 + 0,211 * X$	0,200
	C - MZA	$Y = 2468,678 + 0,542 * X$	0,177
	C - MWa	$Y = 2724,506 + 0,165 * X$	0,180
Dez	A - MZA	$Y = 5354,748 - 0,177 * X$	0,067
	A - MWa	$Y = 4931,609 - 0,033 * X$	0,022
	B - MZA	$Y = -888,984 + 0,909 * X$	0,187
	B - MWa	$Y = 1523,141 + 0,168 * X$	0,188
	C - MZA	$Y = 2719,487 + 0,508 * X$	0,171
	C - MWa	$Y = 2745,856 + 0,168 * X$	0,217

Buscando entender melhor a resposta da cultura do milho ao fator hídrico, para quatro localidades do Rio Grande do Sul, Matzenauer et al. (1995) concluíram que o modelo de Jensen não apresentou a mesma qualidade de ajuste que o modelo de regressão para a localidade de Santo Augusto, já que os coeficientes de determinação foram mais baixos, principalmente para o modelo completo. No referido estudo foram encontrados “r² = 0,839 e “r² = 0,829 para os grupos de maturação precoce e normal, na forma completa do modelo. Resultado distante do observado no presente trabalho, lembrando que os valores do parâmetro λ adotados aqui foram retirados do estudo de Matzenauer et al. (1995).

Para o estudo de Gerstemberger et al. (2010), os modelos agrometeorológicos empregando coeficientes obtidos na literatura também não retornaram satisfatoriamente valores de produtividade equivalentes aos valores reais

de produtividade registrados para as cinco safras de milho, sendo que o melhor “ r^2 ” encontrado foi baixíssimo (“ r^2 ” = 0,1779). Já com os mesmos valores do parâmetro λ do modelo de Minhas, Parikh e Srinivasan utilizados no presente estudo, Gerstemberger et al. (2010) encontraram coeficiente de determinação de 0,7052 e índice “ d ” de 0,6333, enquanto que aqui foram verificados índice “ d ” inferiores a 0,55 em qualquer combinação.

Analogamente aos resultados do presente trabalho, Martins (2012) empregando o modelo de Doorenbos e Kassam, para estimar o rendimento do milho em Araripina/ PE, constatou que os índices estatísticos obtidos mostraram resultados de baixo desempenho. O coeficiente de correlação encontrado foi igual a 0,19, e os valores do índice de confiança e de Willmott apresentaram desempenhos “péssimo” e “mau”, respectivamente.

Figura 8 - Análise de regressão linear entre os valores observados de produtividade real da cultura do milho e estimados com os modelos de: (A) Jensen (1968); (B) Minhas, Parikh e Srinivasan (1974); (C) Doorenbos e Kassan (1979), empregando os parâmetros obtidos na bibliografia para o plantio em outubro.

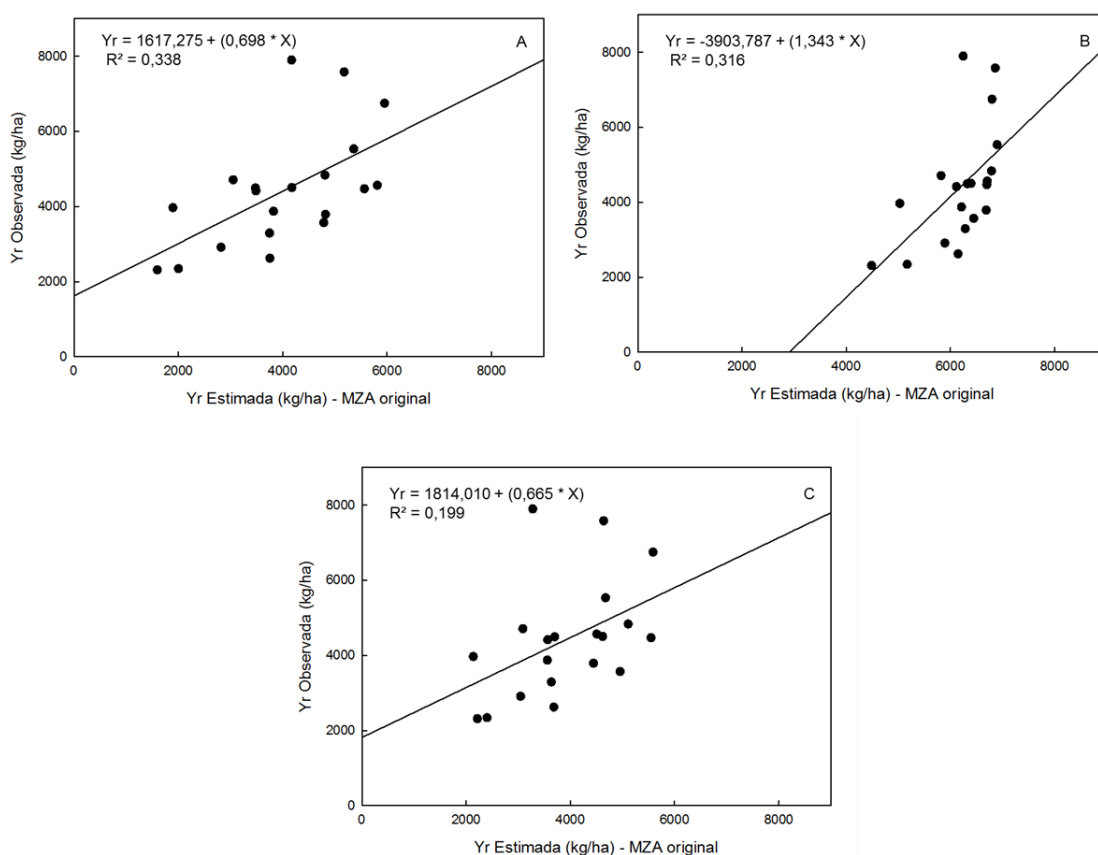
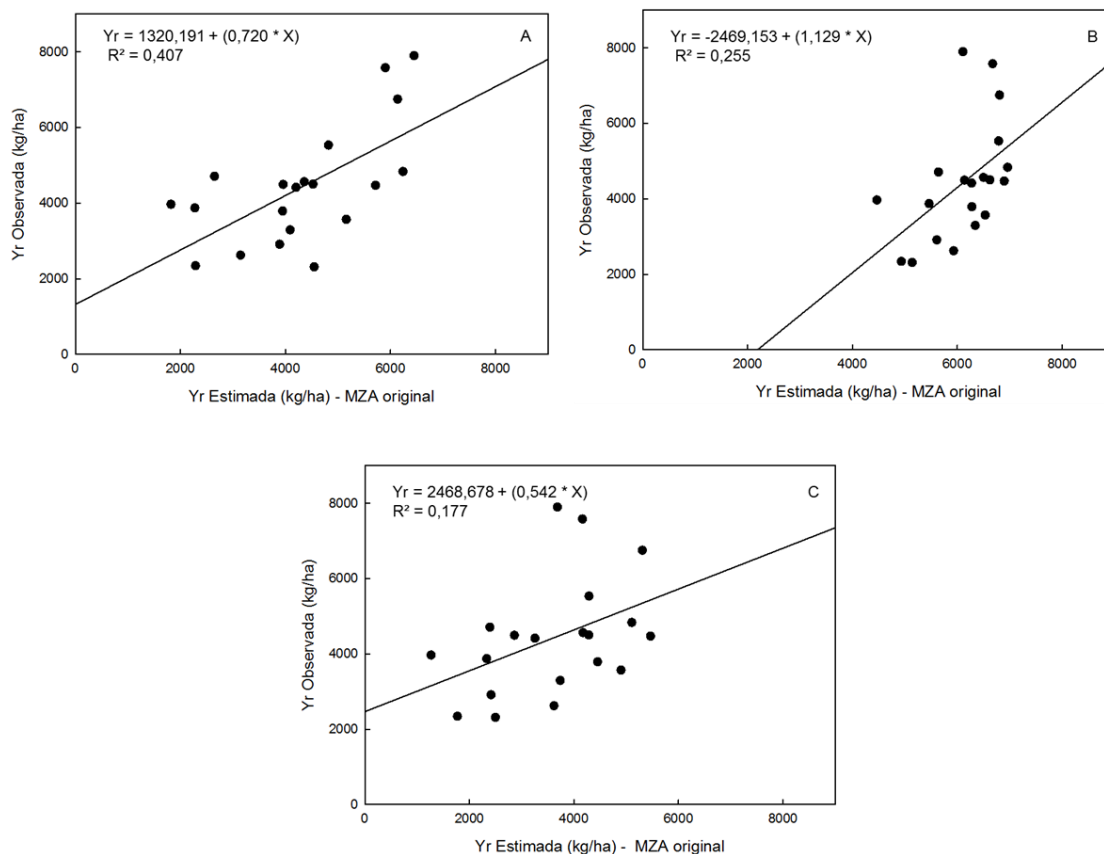


Figura 9 – Análise de regressão linear entre os valores observados de produtividade real da cultura do milho e estimados com os modelos de: (A) Jensen (1968); (B) Minhas, Parikh e Srinivasan (1974); (C) Doorenbos e Kassan (1979), empregando os parâmetros obtidos na bibliografia para plantio em novembro.



Sediyama et al. (2001) descrevem que Doorenbos e Kassam (1979), utilizando o modelo de Stewart et al. (1977), determinaram o fator de sensibilidade β para um estágio de desenvolvimento completo, ao qual chamaram de k_y . Na conclusão do estudo de Sediyama et al. (2001), que analisaram os modelos de Mantovani e de Stewart para a estimativa da produtividade real, os mesmos apontaram que a produtividade das culturas de milho, soja, sorgo e trigo dependeram apenas da produtividade potencial da cultura uma vez que para o mesmo local e data de plantio os valores de k_y e ET_r/ET_m foram iguais. Gerstemberger et al. (2010) também evidenciaram que a produtividade potencial pode influenciar decisivamente nos resultados obtidos nas análises. Observação válida para o presente trabalho na avaliação do método de Doorenbos e Kassam.

Os resultados dos coeficientes de correlação, índice de concordância e índice de desempenho estão dispostos na Tabela 9. O índice de concordância mostrou-se sempre acima de 0,95 indicando exatidão entre as variáveis envolvidas. Com relação ao coeficiente de correlação, que fornece a precisão entre as variáveis, observa-se que o melhor resultado ($r = 0,6380$) foi quando testado o modelo de Jensen associado ao MZA para plantio em novembro.

Tabela 9 – Valores do coeficiente de correlação, índice de concordância, índice de desempenho e sua respectiva interpretação para os modelos de: (A) Jensen (1968); (B) Minhas, Parikh e Srinivasan (1974); (C) Doorenbos e Kassan (1979), com parâmetros recomendados na literatura.

	Modelo	r	d	c	Desempenho
Set	A - MZA	0,1678	0,9633	0,1616	Péssimo
	A - MWa	0,1266	0,9539	0,1208	Péssimo
	B - MZA	0,4789	0,9629	0,4611	Mau
	B - MWa	0,1998	0,9564	0,1911	Péssimo
	C - MZA	0,4659	0,9724	0,4530	Mau
	C - MWa	0,3462	0,9574	0,3315	Péssimo
Out	A - MZA	0,5812	0,9770	0,5678	Sofrível
	A - MWa	0,5282	0,9551	0,5045	Sofrível
	B - MZA	0,5625	0,9707	0,5460	Sofrível
	B - MWa	0,4031	0,9560	0,3853	Péssimo
	C - MZA	0,4464	0,9712	0,4335	Mau
	C - MWa	0,3899	0,9557	0,3726	Péssimo
Nov	A - MZA	0,6380	0,9790	0,6246	Mediano
	A - MWa	0,6331	0,9540	0,6040	Mediano
	B - MZA	0,5051	0,9677	0,4888	Mau
	B - MWa	0,4469	0,9554	0,4269	Mau
	C - MZA	0,4211	0,9697	0,4084	Mau
	C - MWa	0,4246	0,9541	0,4051	Mau
Dez	A - MZA	0,2586	0,9557	0,2471	Péssimo
	A - MWa	0,1480	0,9474	0,1402	Péssimo
	B - MZA	0,4322	0,9706	0,4195	Mau
	B - MWa	0,4334	0,9543	0,4136	Mau
	C - MZA	0,4137	0,9697	0,4012	Mau
	C - MWa	0,4655	0,9532	0,4437	Mau

Numa análise global, o desempenho das diferentes combinações variou de “péssimo” até “mediano”. Sendo os piores resultados para o modelo de Doorenbos e Kassan classificado como “péssimo” e “mau”, em todas as situações. Também foi classificado como “péssimo” o modelo de Jensen para setembro e dezembro. Já para o modelo de Minhas, Parikh e Srinivasan quando combinado com o MWa, para

plântio em setembro e outubro, apresentou o coeficiente de correlação inferior e, conseqüentemente, foi classificado como “péssimo”.

Somente o modelo de Jensen no plântio em novembro apresentou o índice de desempenho como “mediano”. Na sequência, para o plântio em outubro, o modelo de Jensen apresentou índice “c” superior a 0,50, acompanhado do modelo de Minhas, Parikh e Srinivasan combinado com MZA.

Os sete modelos agrometeorológicos testados por Araujo et al. (2011) empregando coeficientes obtidos na literatura também não retornaram satisfatoriamente valores de produtividade equivalentes aos valores reais de produtividade registrados para as 11 safras da soja, e o melhor “ r^2 ” encontrado foi baixíssimo (“ r^2 ” = 0,0321) utilizando o modelo de Minhas, Parikh e Srinivasan.

De forma semelhante, Souza et al. (2013) definem que os modelos agrometeorológicos empregando coeficientes ou fatores de penalização da produtividade por déficit obtidos na bibliografia, não possibilitaram a obtenção de estimativas de produtividade da cultura do trigo estatisticamente satisfatórias, classificando-se como “péssimo” e “mau”, na região de Ponta Grossa, Paraná.

Diante dos resultados insatisfatórios, outro procedimento adotado por diversos autores consiste na realização do ajuste estatístico dos parâmetros dos modelos agrometeorológicos. Diferenças entre as cultivares, manejo, tipo de solo, fertilidade, clima, entre outros, variam de região para região, e até dentro da mesma região (BERLATO, 1987 apud ARAUJO, 2008). Desta forma, o autor salienta a importância da calibração de coeficientes ou fatores para cada localidade, o que possibilita a obtenção de estimativas mais precisas de produtividade por meio de modelos agrometeorológicos.

4.3.2 Análise de regressão linear entre produtividade real observada e estimada, utilizando parâmetros ajustados com os dados da região de Cruz Alta/ RS

Na sequência procedeu-se o ajuste dos parâmetros dos modelos agrometeorológicos, conforme apresentado no item 3.5 dos materiais e métodos. Na Tabela 10 estão expostos os novos valores dos parâmetros para as conjunções dos

três modelos agrometeorológicos testados, com os dois modelos de produtividade potencial e nas quatro datas de plantio simuladas.

Tabela 10 – Valores dos parâmetros ajustados com os dados da região de Cruz Alta/RS para os modelos de: (A) Jensen (1968); (B) Minhas, Parikh e Srinivasan (1974); (C) Doorenbos e Kassan (1979).

	Modelo	Parâmetro	Estádios				Todo ciclo	Obtenção	
			I	II	III	IV			
Set	A - MZA	λ_i	0,175	-1,346	-0,011	0,575	*	Regressão múltipla	
	A - MWa		0,082	-1,649	-0,177	0,580	*		
	B - MZA	λ_i	0,399	-4,863	0,131	0,786	*		
	B - MWa		0,243	-5,963	-0,125	0,781	*		
	C - MZA	Ky	*	*	*	*	0,959		Regressão simples
	C - MWa		*	*	*	*	0,299		
Out	A - MZA	λ_i	-0,943	-0,499	0,613	0,218	*	Regressão múltipla	
	A - MWa		-1,162	-0,622	0,571	0,194	*		
	B - MZA	λ_i	-2,518	-0,928	0,887	0,199	*		
	B - MWa		-3,419	-1,131	0,809	0,167	*		
	C - MZA	Ky	*	*	*	*	0,807		Regressão simples
	C - MWa		*	*	*	*	0,227		
Nov	A - MZA	λ_i	-0,768	0,699	0,374	-0,330	*	Regressão múltipla	
	A - MWa		-0,803	0,673	0,388	-0,480	*		
	B - MZA	λ_i	-1,438	1,078	0,439	-0,442	*		
	B - MWa		-1,519	1,042	0,473	-0,696	*		
	C - MZA	Ky	*	*	*	*	0,684		Regressão simples
	C - MWa		*	*	*	*	0,176		
Dez	A - MZA	λ_i	0,257	0,544	-0,365	0,029	*	Regressão múltipla	
	A - MWa		0,298	0,434	-0,444	0,037	*		
	B - MZA	λ_i	0,359	0,873	-0,631	0,064	*		
	B - MWa		0,438	0,705	-0,789	0,084	*		
	C - MZA	Ky	*	*	*	*	0,658		Regressão simples
	C - MWa		*	*	*	*	0,163		

Após a realização dos ajustes nos parâmetros dos modelos agrometeorológicos ficou evidente a melhora no coeficiente de determinação, como pode ser visto na Tabela 11. Destaque para os modelos de Jensen e Minhas, Parikh e Srinivasan, no plantio em outubro e novembro.

Em novembro, ambos os modelos, tiveram, em média, apenas 24% da variância da regressão não dependente das variáveis estudadas. Para outubro pode-se verificar “ r^2 ” de 0,662 e 0,599 quando combinados os modelos de Jensen e Minhas, Parikh e Srinivasan, nessa ordem, com o MZA.

Novamente o modelo de Doorenbos e Kassan apresentou coeficiente de determinação insatisfatório, nas diferentes situações demonstrou “ r^2 ” variando de

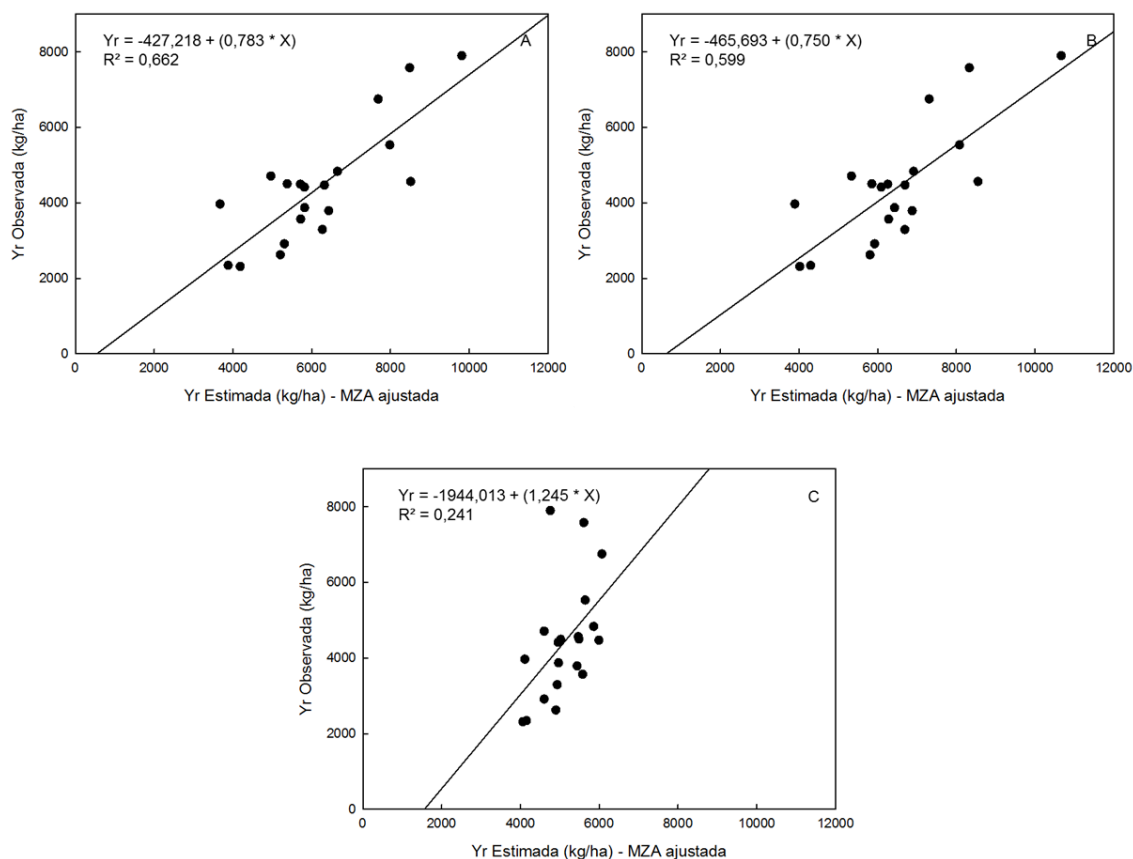
0,017 até 0,241. Possivelmente em função de adotar um valor de k_y único para todo ciclo, enquanto os demais modelos separam os parâmetros de penalização da produtividade por déficit em estádios, acompanhando melhor as necessidades de cada fase da cultura.

Tabela 11 – Valores dos coeficientes linear e angular da reta e seu respectivo coeficiente de determinação para os modelos de: (A) Jensen (1968); (B) Minhas, Parikh e Srinivasan (1974); (C) Doorenbos e Kassan (1979), utilizando parâmetros ajustados com os dados da região de Cruz Alta/ RS.

	Modelo	Equação	r^2
Set	A - MZA	$Y = -293,776 + 0,792 * X$	0,466
	A - MWa	$Y = 347,118 + 0,240 * X$	0,364
	B - MZA	$Y = -186,210 + 0,744 * X$	0,426
	B - MWa	$Y = 514,978 + 0,235 * X$	0,326
	C - MZA	$Y = -1072,960 + 1,171 * X$	0,239
	C - MWa	$Y = 2507,035 + 0,127 * X$	0,017
Out	A - MZA	$Y = -427,218 + 0,783 * X$	0,662
	A - MWa	$Y = -120,412 + 0,243 * X$	0,642
	B - MZA	$Y = -465,693 + 0,750 * X$	0,599
	B - MWa	$Y = -21,929 + 0,236 * X$	0,570
	C - MZA	$Y = -1944,013 + 1,245 * X$	0,241
	C - MWa	$Y = 1182,948 + 0,182 * X$	0,052
Nov	A - MZA	$Y = -92,606 + 0,714 * X$	0,746
	A - MWa	$Y = 76,989 + 0,220 * X$	0,781
	B - MZA	$Y = -239,497 + 0,696 * X$	0,745
	B - MWa	$Y = -135,714 + 0,225 * X$	0,794
	C - MZA	$Y = -2339,972 + 1,265 * X$	0,230
	C - MWa	$Y = 220,247 + 0,216 * X$	0,111
Dez	A - MZA	$Y = -263,764 + 0,882 * X$	0,473
	A - MWa	$Y = 615,672 + 0,225 * X$	0,483
	B - MZA	$Y = -415,679 + 0,824 * X$	0,447
	B - MWa	$Y = 470,158 + 0,217 * X$	0,472
	C - MZA	$Y = -1774,540 + 1,196 * X$	0,213
	C - MWa	$Y = 1480,303 + 0,149 * X$	0,109

Nas Figuras 10, 11 e 12 são apresentadas as análises de regressão linear entre os valores de produtividade observada e estimada pelos três modelos agrometeorológicos testados de Jensen (1968); Minhas, Parikh e Srinivasan (1974); e Doorenbos e Kassan (1979) para plantio em outubro, novembro e dezembro, respectivamente. O coeficiente angular maior que zero e o teste t significativo garantiram correlação positiva em todas as situações.

Figura 10 - Análise de regressão linear entre os valores observados de produtividade real da cultura do milho e estimados com os modelos de: (A) Jensen (1968); (B) Minhas, Parikh e Srinivasan (1974); (C) Doorenbos e Kassan (1979), empregando os parâmetros ajustados com os dados da região de Cruz Alta/ RS, para o plantio em outubro.



Resultados superiores foram demonstrados por Andrade Júnior et al. (2006), em que os coeficientes de determinação obtidos da análise de regressão foram de 0,9183 e 0,8765, para os modelos de Jensen e Minhas et al., respectivamente.

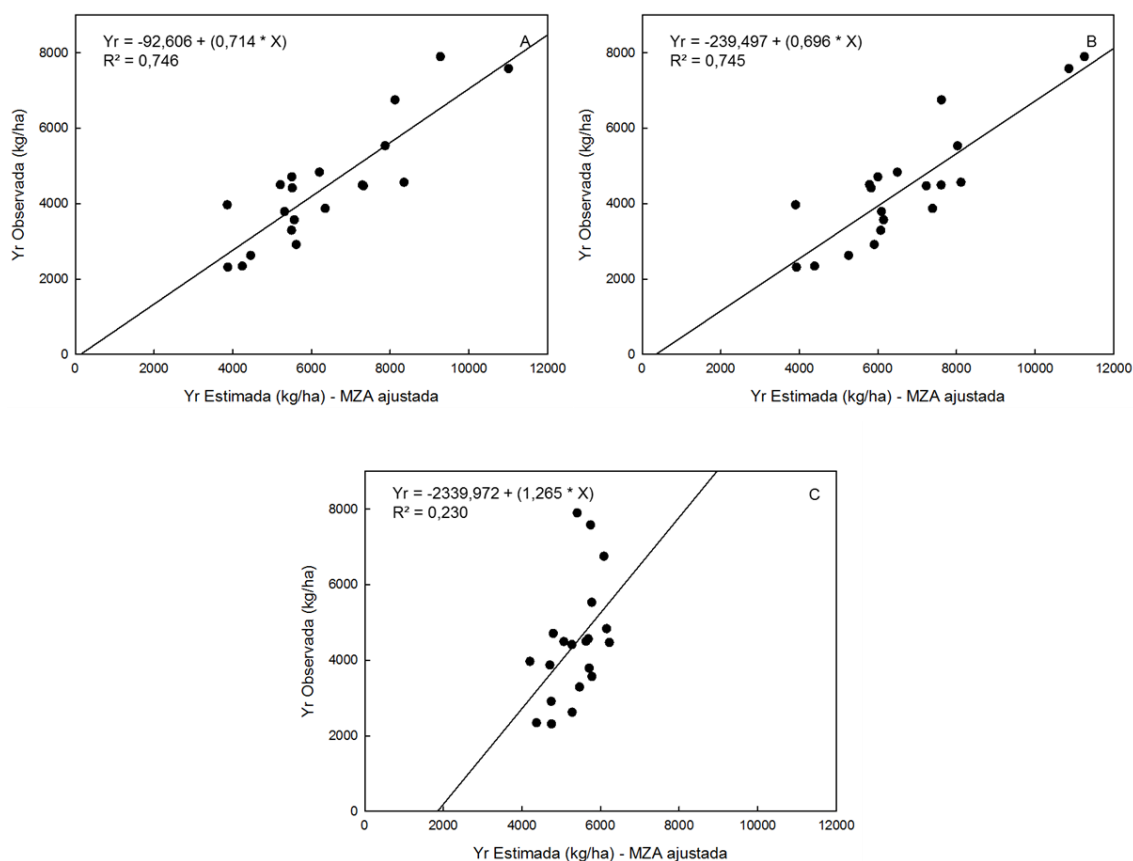
Para o estudo em questão, estes autores afirmaram que o modelo de Stewart et al. (1977) apresentou maior precisão e exatidão na estimativa da produtividade de grãos da cultura do milho, na região de Parnaíba, Piauí.

Gerstemberger et al. (2010) encontraram coeficiente de determinação de 0,7052 e índice “d” de 0,6333 com o modelo de Minhas, Parikh e Srinivasan, para as análises com as médias de todos os sistemas de plantio analisados.

Portanto, os autores acima citados concluíram que o modelo, utilizando coeficientes e fatores obtidos por regressão e produtividade potencial da região,

proporcionou relações lineares estreitas entre as produtividades reais e estimadas de milho, na região de Ponta Grossa, Paraná.

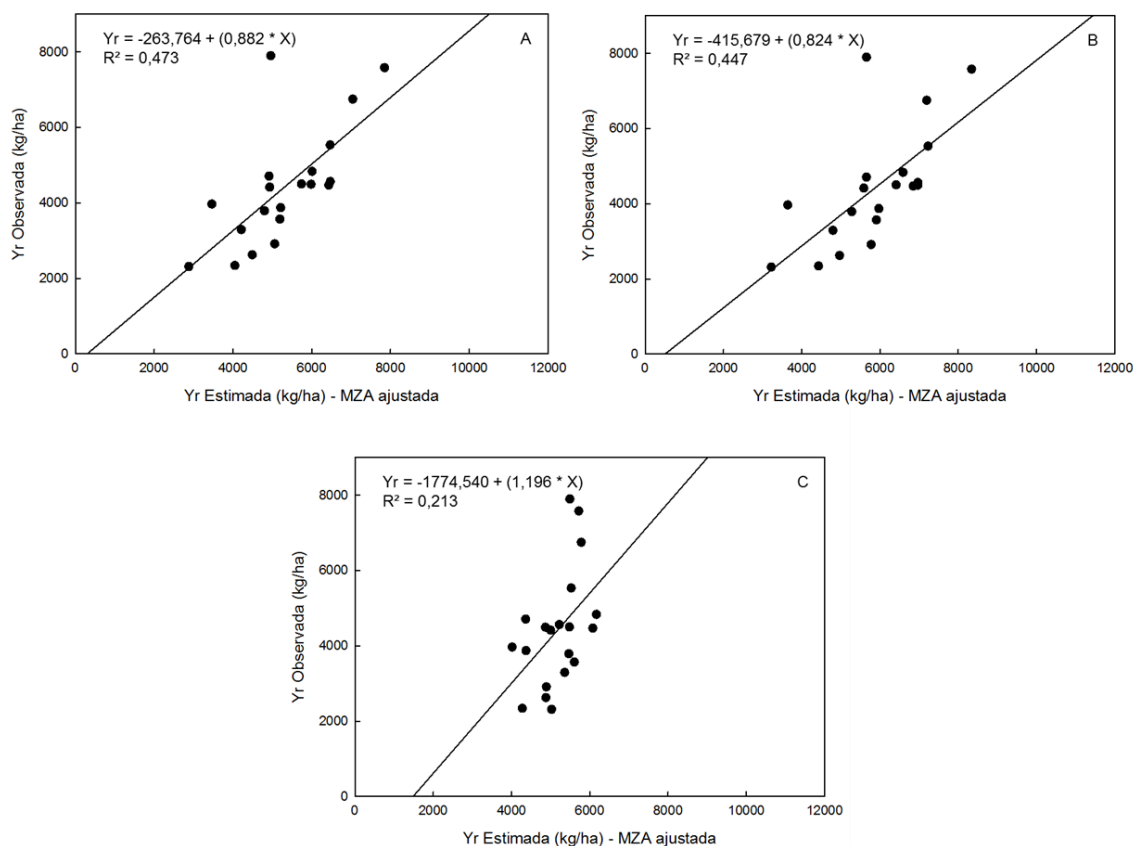
Figura 11 – Análise de regressão linear entre os valores observados de produtividade real da cultura do milho e estimados com os modelos de: (A) Jensen (1968); (B) Minhas, Parikh e Srinivasan (1974); (C) Doorenbos e Kassan (1979), empregando os parâmetros ajustados com os dados da região de Cruz Alta/ RS, para o plantio em novembro.



Para a cultura da soja, no Rio Grande do Sul, Fontana et al. (2001) concluíram que o modelo multiplicativo de Jensen modificado pode ser usado na estimativa do rendimento da cultura.

Ainda, segundo os autores, o modelo completo, que abrange todo o ciclo da cultura (novembro a abril), explicou 87% da variação dos rendimentos, enquanto que o modelo reduzido, que usa somente o período crítico da cultura à água (janeiro, fevereiro e março), apresentou um coeficiente de determinação de 0,76, podendo ser incorporado a programas de previsão de safras por ter caráter preditivo.

Figura 12 – Análise de regressão linear entre os valores observados de produtividade real da cultura do milho e estimados com os modelos de: (A) Jensen (1968); (B) Minhas, Parikh e Srinivasan (1974); (C) Doorenbos e Kassan (1979), empregando os parâmetros ajustados com os dados da região de Cruz Alta/ RS, para o plantio em dezembro.



Os valores dos coeficientes de correlação, índice de concordância e índice de desempenho estão organizados na Tabela 12. O índice de concordância mostrou-se sempre acima de 0,95 indicando exatidão entre as variáveis envolvidas. Coeficientes de correlação acima de 0,80 foram verificados para Jensen em outubro e novembro, e também para Minhas, Parikh e Srinivasan em novembro.

Ainda o modelo de Minhas, Parikh e Srinivasan, em outubro, apresentou bom valor de "r", lembrando que quanto maior o valor absoluto maior o grau de associação entre os valores observados e os valores estimados. Nas demais épocas (setembro e dezembro) estes modelos não apresentaram bom coeficiente de correlação, assim como os menores valores foram do modelo de Doorenbos e Kassan em qualquer combinação estudada.

Tabela 12 – Valores do coeficiente de correlação, índice de concordância, índice de desempenho e sua respectiva interpretação para os modelos de: (A) Jensen (1968); (B) Minhas, Parikh e Srinivasan (1974); (C) Doorenbos e Kassan (1979), utilizando parâmetros ajustados com os dados da região de Cruz Alta/ RS.

	Modelo	r	d	c	Desempenho
Set	A - MZA	0,6825	0,9781	0,6675	Bom
	A - MWa	0,6035	0,9551	0,5764	Sofrível
	B - MZA	0,6529	0,9752	0,6367	Mediano
	B - MWa	0,5709	0,9552	0,5454	Sofrível
	C - MZA	0,4888	0,9679	0,4732	Mau
	C - MWa	0,1315	0,9565	0,1258	Péssimo
Out	A - MZA	0,8136	0,9819	0,7989	Muito bom
	A - MWa	0,8015	0,9538	0,7644	Muito bom
	B - MZA	0,7739	0,9791	0,7577	Muito bom
	B - MWa	0,7548	0,9538	0,7199	Bom
	C - MZA	0,4905	0,9701	0,4758	Mau
	C - MWa	0,2278	0,9559	0,2178	Péssimo
Nov	A - MZA	0,8637	0,9782	0,8449	Muito bom
	A - MWa	0,8837	0,9523	0,8415	Muito bom
	B - MZA	0,8631	0,9771	0,8433	Muito bom
	B - MWa	0,8909	0,9525	0,8485	Muito bom
	C - MZA	0,4793	0,9702	0,4650	Mau
	C - MWa	0,3325	0,9556	0,3177	Péssimo
Dez	A - MZA	0,6875	0,9827	0,6756	Bom
	A - MWa	0,6951	0,9539	0,6631	Bom
	B - MZA	0,6684	0,9804	0,6553	Bom
	B - MWa	0,6867	0,9537	0,6549	Bom
	C - MZA	0,4612	0,9684	0,4466	Mau
	C - MWa	0,3306	0,9544	0,3155	Péssimo

Percebe-se que o desempenho das diferentes combinações variou de “péssimo” até “muito bom”. Os piores resultados foram do modelo de Doorenbos e Kassan, sendo classificado como “péssimo” na conjunção com MWa e “mau” quando combinado com o MZA, em qualquer época de plantio.

O modelo de Jensen foi classificado como “muito bom”, em outubro e novembro, tanto para a associação com o MWa e o MZA, resultado que também foi encontrado para o modelo de Minhas, Parikh e Srinivasan em novembro. Já para o plantio em outubro o modelo de Minhas, Parikh e Srinivasan apresentou-se como “muito bom” apenas na combinação com o MZA. Cabe destacar que, para o plantio em dezembro, os modelos de Jensen e Minhas, Parikh e Srinivasan apresentaram índice de desempenho “bom”.

O modelo de Jensen utilizando coeficientes e fatores obtidos por regressão múltipla, no estudo de Souza et al. (2013), proporcionou relações lineares mais estreitas entre as produtividades reais e estimadas da cultura do trigo, e o seu desempenho obtido foi classificado como “muito bom” em Ponta Grossa, Paraná. Para o modelo de Minhas, Parikh e Srinivasan o índice “c” se apresentou como “mediano”, enquanto que o modelo de Doorenbos e Kassan permaneceu classificado como “péssimo”.

Após o ajuste estatístico dos coeficientes ou fatores dos modelos agrometeorológicos usados na estimativa da produtividade da cultura da soja, na região de Ponta Grossa, Paraná, Araujo et al. (2011) encontraram melhores resultados para os modelos de Jensen e Minhas, Parikh e Srinivasan, apresentando “r²” igual a 0,4412 e 0,3098, respectivamente. Resultados inferiores ao encontrados no presente estudo, até mesmo para o modelo de Doorenbos e Kassam (1979) que, segundo estes autores, o coeficiente de determinação não alterou (“r²” = 0,0197), sendo observada apenas uma discreta melhora no índice “d” igual a 0,3572.

Cabe ainda destacar a afirmação de Matzenauer et al. (1995), que o modelo de Jensen, que utiliza como variável independente o consumo relativo de água, pode ser utilizado para a estimativa do rendimento de grãos da cultura do milho. O consumo relativo de água (índice ETr / ETm) é uma variável eficiente para indicar as variações de rendimento de grãos de milho entre épocas de semeadura, anos e locais no estado do Rio Grande do Sul.

Observação semelhante feita por Araujo (2008) e Souza et al. (2013), os quais descrevem que os modelos testados apresentaram bom desempenho, especialmente pela sua simplicidade, pois consideraram somente o consumo relativo de água como variável independente. No entanto, é de conhecimento geral que a produtividade é resultado da interação entre fatores intrínsecos (genética, adaptabilidade) e extrínsecos (luz, água, solo, ocorrência de pragas, entre outros) à planta. Assim como estes autores confirmam também a afirmação inicial de Frizzone et al. (2005), que a produtividade pode ser expressa exclusivamente em função da água utilizada pelo cultivo, estando todas as outras variáveis inerentes à produtividade fixas em nível ótimo.

Portanto, em função dos resultados obtidos nas inúmeras análises realizadas, e dos parâmetros ajustados dos modelos, apresentados na Tabela 10, considera-se

que houve êxito na estimativa da produtividade real da cultura do milho através dos modelos agrometeorológicos de Jensen (1968) e Minhas, Parikh e Srinivasan (1974) para a microrregião de Cruz Alta/ RS.

Conclui-se que as melhores respostas foram para o modelo de Jensen (1968) no plantio em outubro e novembro, já para o modelo de Minhas, Parikh e Srinivasan (1974) foi para o plantio em novembro, e em outubro somente na combinação com o MZA. Recomendam-se os coeficientes de -0,768, 0,699, 0,374 e -0,330 para o modelo de Jensen (1968), e os coeficientes de -1,438, 1,078, 0,439 e -0,442 para o modelo de Minhas, Parikh e Srinivasan (1974), conforme o estágio fenológico I, II, III e IV, respectivamente.

4.4 FREQUÊNCIA DE PERDA DE PRODUTIVIDADE POTENCIAL

Foram simuladas as quebras de rendimento (Tabela 13) para o período estudado, e convertido em frequência relativa para diferentes faixas de quebra de rendimento (Figura 13) para análise dos resultados.

Tabela 13 – Quebra de rendimento da cultura do milho na região de Cruz Alta/ RS.

Anos	Yr Observada (kg ha ⁻¹)	Quebra (%)			
		Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
1994	3788	42,8	47,8	47,6	46,5
1995	4500	32,9	36,4	38,0	36,0
1996	2314	66,8	68,8	69,0	67,4
1997	2622	60,4	63,2	64,0	63,7
1998	3569	43,8	46,9	47,8	46,4
1999	2913	57,4	60,8	61,5	59,9
2000	2341	66,1	68,1	68,8	67,4
2001	4832	28,3	33,1	34,9	32,9
2002	3292	51,6	54,9	56,4	54,3
2003	4470	29,6	34,3	37,4	35,8
2004	4563	31,9	36,8	39,3	39,0
2005	3869	44,3	48,7	49,0	48,1
2006	4492	35,3	39,6	41,9	39,0
2007	5532	21,7	25,3	27,0	23,7
2008	4708	30,8	36,0	38,8	36,7
2009	4413	37,5	41,1	42,7	40,6
2010	6747	-4,0	2,8	3,9	4,3
2011	7897	-13,5	-5,9	-5,5	-9,7
2012	3966	44,5	48,6	48,8	47,6
2013	7579	-11,7	-2,8	1,0	-5,8

Nota-se uma alternância maior nos resultados de quebra de rendimento conforme o ano avaliado do que em relação ao período de plantio da cultura do milho. Outro apontamento feito é com relação aos valores negativos que indicam que a produtividade observada foi superior ao valor estimado, evidenciado a partir do ano de 2010.

Nos anos de 1996, 1999 e 2000, foram verificadas as maiores quebras de rendimento, em grande parte explicada pela precipitação inferior à média climatológica. Cabe ainda salientar o ano de 2012 que, devido à estiagem do ano anterior, alcançou produtividade inferior ao crescente que vinha sendo observado. Em 1997 também ocorreu quebra de rendimento elevada, porém neste caso, provavelmente, foi em função de um excedente hídrico no período de safra.

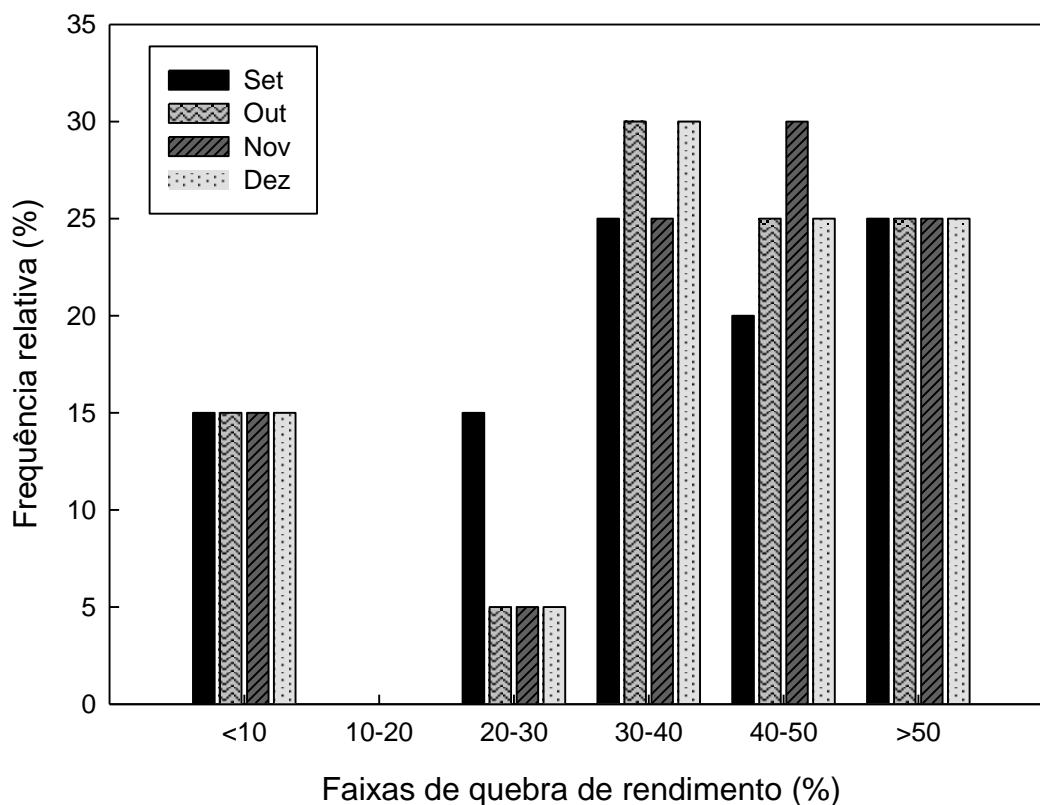
É notório o aumento da produtividade local, confirmado por Battisti et al. (2012), os quais verificaram que o milho teve o maior ganho de eficiência agrícola, para o período de 1980 a 2008. Os autores concluíram que isto foi possível pela melhoria da fertilidade e uso do solo, mecanização agrícola, preço pago às *commodities*, investimento em pesquisa e desenvolvimento, zoneamento agrícola de risco climático e melhoramento genético.

Cabe ainda destacar as iniciativas para desburocratizar o agronegócio, por exemplo, o Agro+ RS, que fomenta ações de irrigação para várias culturas. Recentemente este plano do Estado, implementado através da Secretaria da Agricultura, Pecuária e Irrigação, simplificou o acesso dos produtores a sistemas modernos de irrigação, ao extinguir, em alguns casos, a necessidade de licença para o pivô (PRESS AGROBUSINESS, 2017). Projeto importante, visto que ainda é pequena a área irrigada e sendo o milho mais sensível à falta de umidade que outros grãos.

Além disso, quando os dados são convertidos em frequência relativa, apresentado na Figura 13, percebe-se quebra de rendimento na maioria dos anos estudados, notoriamente nas faixas maiores de 30% de perda de produtividade, podendo atingir frequência relativa de 30% para outubro, novembro e dezembro. Esses extremos de frequência correspondem a seis anos do total avaliado. Inclusive na faixa com menos de 10% de perdas, em qualquer época avaliada, foram observados prejuízos em 15% dos anos, correspondente a três anos do período total considerado. Verificou-se que a cultura do milho é afetada pela deficiência hídrica na

primavera-verão, ocasionando riscos de obtenção de produtividade de grãos abaixo da expectativa.

Figura 13 – Frequência de perda da produtividade potencial para a cultura do milho na região de Cruz Alta/ RS.



Resultado semelhante para o estudo de Wagner et al. (2013), em que a cultura do milho foi afetada pela distribuição da disponibilidade de água ao longo do ciclo fenológico e a probabilidade média de redução de produção por deficiência hídrica foi de aproximadamente 50%. Neste estudo, que considerou a realização da semeadura em diferentes momentos dentro do período recomendado pelo zoneamento agrícola do estado do Paraná, foi verificada produção média de 7091 kg/ha para o município de Guarapuava.

Altos percentuais de quebra também foram registrados no trabalho de Prela-Pantano et al. (2012) para a cultura do milho em Cândido Mota, SP, inclusive o modelo que considera déficit e excedente hídrico, apresentou resultados com maiores % de quebra na produtividade. Estes autores também comprovaram que há

uma relação direta entre a produtividade e a distribuição das chuvas durante o cultivo de milho nessa localidade.

Marin et al. (2006) também confirmaram que o regime de chuva de cada localidade estudada explica em grande parte a variação das curvas de quebra. Na avaliação decenal da quebra relativa de produtividade da cultura do sorgo, estes autores verificaram que, para as localidades de Manduri, Piracicaba, Ribeirão Preto e Ilha Solteira, no estado de São Paulo, o período compreendido entre outubro e dezembro é o que oferece menores riscos de perdas. Informação que não pode ser afirmada no presente trabalho, visto que foram avaliados somente os plantios nos meses compreendidos pelo zoneamento agrícola de risco climático para a cultura do milho no estado do Rio Grande do Sul.

Quando avaliaram a cultura do girassol, Marin et al. (2000) verificaram que houve diferença significativa entre as localidades de Piracicaba, Ribeirão Preto e Manduri, nas épocas compreendidas entre abril e agosto, podendo ser explicado pela distinta distribuição sazonal das chuvas nessas localidades, o que resulta em condições hídricas dos solos diferenciadas. No entanto, no período das chuvas (semeaduras realizadas entre 21/09 e 11/02), não houve diferença entre as três localidades, com as quebras médias de rendimento ficando abaixo de 10%.

Em relação às frequências médias mensais para diferentes faixas de quebra do estudo de Marin et al. (2006), os resultados do presente trabalho se assemelharam aos efeitos observados em Ilha Solteira, onde as maiores quebras se concentraram na faixa acima de 20% de frequência para os meses de setembro, outubro e novembro, podendo atingir 63% de frequência dos casos analisados. Para dezembro 43,3% das observações ficaram na faixa de 6-10% de perdas.

Os resultados aqui obtidos, além de se aproximarem com os de outros autores, apresentam ainda o risco de quebra de rendimento para cada época de semeadura, informação essa fundamental ao planejamento e à tomada de decisão com relação à implantação da cultura.

5 CONCLUSÃO

Segundo a metodologia utilizada neste estudo e os resultados obtidos, foi possível concluir que:

- O método de Wageningen tende a superestimar a produtividade potencial que acarreta em uma superestimativa da produtividade real, enquanto que o método da zona agroecológica acompanhou melhor as flutuações dos resultados.
- Os modelos agrometeorológicos testados nas diferentes combinações, com parâmetros recomendados na literatura, apresentaram coeficiente de determinação insatisfatório, com o desempenho variando de péssimo a mediano.
- Após a realização dos ajustes nos parâmetros dos modelos agrometeorológicos houve melhora no coeficiente de determinação, com destaque para os modelos de Jensen e Minhas, Parikh e Srinivasan, no plantio em outubro e novembro.
- O desempenho das diferentes combinações variou de péssimo até muito bom, sendo que o modelo de Jensen foi classificado como muito bom em outubro e novembro, resultado que também foi encontrado para o modelo de Minhas, Parikh e Srinivasan em novembro.
- Recomendam-se os coeficientes de -0,768, 0,699, 0,374 e -0,330 para o modelo de Jensen, e os coeficientes de -1,438, 1,078, 0,439 e -0,442 para o modelo de Minhas, Parikh e Srinivasan, conforme o estágio fenológico I, II, III e IV, respectivamente.
- Ocorreu quebra de rendimento na maioria dos anos estudados, notoriamente nas faixas maiores de 30% de perda de produtividade, podendo atingir frequência relativa de 30% para outubro, novembro e dezembro.
- A cultura do milho é afetada pela deficiência hídrica na primavera-verão, ocasionando riscos de obtenção de produtividade de grãos abaixo da expectativa para a microrregião de Cruz Alta/ RS.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Águas (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2012**. Ed. Especial. - Brasília : ANA, 2012. 215 p.
- AGUIAR, R. Estiagem: como conviver com esse fenômeno? **Extensão Rural e Desenvolvimento Sustentável**. Porto Alegre, v.1 n.4, nov/dez, 2005.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998, 297p. (FAO Irrigation and Drainage, Paper 56).
- ANDRADE JÚNIOR, A. S. de.; FIGUEREDO JÚNIOR, L. G. M. de.; CARDOSO, M. J.; RIBEIRO, V. Q. Parametrização de modelos agrometeorológicos para estimativa de produtividade da cultura do milho na região de Parnaíba, Piauí. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 37, n. 2, p. 130-134, 2006.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S. de.; FIGUEREDO JÚNIOR, L. G. M. de.; MOUSINHO, F. E. P.; CARDOSO, M. J.; LEAL, C. M. **Modelo para estimativa de produtividade da cultura do milho no Estado do Piauí**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2007. 73 p. (Documentos, Embrapa/ Meio-Norte, 157).
- ARAUJO, M. A. de. **Modelos agrometeorológicos na estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa – Paraná**. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2008.
- ARAUJO, M. A.; SOUZA, J. L. M. de.; TSUKAHARA, R. Y. Modelos agrometeorológicos na estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 1, p. 23-31, 2011.
- Atlas Socioeconômico do Estado do Rio Grande do Sul. Disponível em: http://www1.seplag.rs.gov.br/atlas/conteudo.asp?cod_menu_filho=819&cod_menu=817&tipo_menu=ECONOMIA&cod_conteudo=1492
>. Acesso em junho de 2017.
- AVILA, A. M. H. de.; BERLATO, M. A.; SILVA, J. B. da.; FONTANA, D. C. Probabilidade de ocorrência de precipitação pluvial mensal igual ou maior que a evapotranspiração potencial para a estação de crescimento das culturas de primavera-verão no estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v.2, n.2, p. 149-154, 1996.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PILAU, F. G. Eficiência agrícola da produção de soja, milho e trigo no estado do Rio Grande do Sul entre 1980 e 2008. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.42, n.1, p. 24-30, jan, 2012.
- BERGAMASCHI, H. et al. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. 2.ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 1992. 125p.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A.; BERGONCI, J.I.; BIANCHI, C.A.M.; MÜLLER, A.G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B.M.M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 9, p. 831-839, 2004.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; COMIRAN, F.; BERGONCI, J. I.; MÜLLER, A. G.; FRANÇA, S.; SANTOS, A. O.; RADIN, B.; BIANCHI, C. A. M.; PEREIRA, P. G. Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.2, p.243-249, fev. 2006.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. - Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2014. 84 p.

BERGAMASCHI, H.; WHEELER, T. R.; CHALLINOR, A. J.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Maize yield and rainfall on different spatial and temporal scales in Southern Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 5, p. 603-613, 2007.

BERNARDO, S. **Produção agrícola e uso da água**. Importância e padrões do uso da água na agricultura brasileira. In: Simpósio Nacional sobre o Uso da Água na Agricultura, Passo Fundo, set. 2004. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/upf/salassier.pdf>>. Acesso em janeiro de 2015.

BONNECARRÈRE, R. A. G. **Adaptação do método da zona agroecológica para simulação estocástica da produtividade da cultura de milho no Estado do Rio Grande do Sul**. Tese (Doutorado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, São Paulo, SP, 2007.

BUSKE, T. C.; PIMENTA, B. D. ; KIRCHNER, J. H. ; PEITER, M. X. ; ROBAINA, A. D. . Balanço Hídrico Climatológico para o município de Cruz Alta - RS. In: XXV CONIRD - Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 2015, São Cristóvão/ SE. **Anais...** São Cristóvão/ SE: XXV CONIRD, 2015. p. 316-321.

BUSKE, T. C.; ROBAINA, A. D. ; PEITER, M. X. ; GOLLO, E. A. ; BRUNING, J. ; LOREGIAN, M. V. ; RODRIGUES, P. E. C. Extrato do balanço hídrico climatológico para o município de Cruz Alta - RS. In: 31ª Jornada Acadêmica Integrada, 2016, Santa Maria/ RS. **Anais...** Santa Maria/ RS, 31ª JAI, 2016.

CAMARGO, A. P. de; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, p. 89–97, 1997.

CAMPOS, J. H. B. da C. **Impactos das alterações climáticas sobre a área de cultivo e produtividade de milho e feijão no nordeste do Brasil usando modelagem agrometeorológica**. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2010.

COOMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos. Disponível em:

<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_07_12_11_17_01_boletim_gaos_julho_2017.pdf>. Acesso em julho de 2017.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1979. (FAO Irrigation and Drainage, Paper 33).

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. M. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1975. 179 p. (Irrigation and Drainage, Paper 24).

DOURADO-NETO, D. et al. Balance hídrico cíclico y secuencial: estimación de almacenamiento de agua en el solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 46, jul 1999.

DOURADO NETO, D.; JONG VAN LIER, Q. de. Estimativa do armazenamento de água no solo para realização de balanço hídrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.17, n. 1, p. 9-15,1993.

DOURADO NETO, D. ; SPAROVEK, G. ; FIGUEIREDO JR., L. G. M. ; FANCELLI, A. L. ; MANFRON, P. A. ; MEDEIROS, S. L. P. . Modelo para estimação da produtividade de grãos de milho deplecionada com base no balanço hídrico no solo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 359-367, 2004.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Disponível em: < http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_6_ed/cultivares.htm >. Acesso em junho de 2017.

EMYGDIO, B. M.; ROSA, A. P. S. A. da; TEIXEIRA, M. C. C. **Indicações técnicas para o cultivo de milho e de sorgo no Rio Grande do Sul: Safras 2013/2014 e 2014/2015**. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 124p.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de Milho**. Guaíba, Porto Alegre: Agropecuária, 2000. 360p.

FAO - Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura. **ETo Calculator**. Manual (38p) e software Version 3.1. 2009. Land and Walter Digital Media Series N° 36.

FARIA, R. T. de; CARAMORI, P. H.; CHIBANA, E. Y.; BRITO, L. R. de S.; NAKAMURA, A. K.; FERREIRA, A. R. **CLIMA - programa computacional para organização e análise de dados meteorológicos**. Londrina: IAPAR, 2002. 29p. (IAPAR. Boletim Técnico, 66).

FIGUEREDO JR., L. G. M. de. **Modelo para estimativa da produtividade de grãos de milho no estado de São Paulo**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP, 2004.

FONSECA, E.L. da; FORMAGGIO, A.R.; PONZONI, F.J. Parametrização de modelo agrometeorológico - espectral para estimativa da produção de pastagens do bioma Campos Sulinos (RS). In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2005, Goiânia, **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 127-134.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A. Relação entre el niño oscilação sul (enos), precipitação e rendimento de milho no estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v.2, n.1, p. 39-46, 1996.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M. A.; LAUSCHNER, M. H.; MELLO, R. W. de. Modelo de estimativa de rendimento de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 399-403, mar. 2001.

FRIZZONE, J. A. **Funções de resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) ao uso de nitrogênio e lâminas de irrigação**. 1986. 133 p. Dissertação (Mestrado em solos e nutrição de plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP, 1986.

FRIZZONE, J. A. Função de produção. In: Faria, M.A.; Silva, E.L.; Vilella, L.A.A.; Silva, A.M. (Ed.). **Manejo da irrigação**. Lavras: UFLA, Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998. p.86-116.

FRIZZONE, J. A. Planejamento da irrigação com uso de técnicas de otimização. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.1, n.1, p.24-49, 2007.

FRIZZONE, J. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SOUZA, J. L. M.; ZOCOLER, J. L. **Funções de produção água-cultura**. In: FRIZZONE, J. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SOUZA, J. L. M.; ZOCOLER, J. L. (Ed.). Planejamento de irrigação: análise e decisão de investimento. Brasília: Embrapa, 2005, p. 283-314.

FRIZZONE, J. A.; OLLITA, A. F. L.; PEREIRA, G. T. Funções de resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) ao uso do nitrogênio e lâmina de irrigação. Região de produção racional. **ITEM - Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, n. 28, p. 26-32, mar. 1987.

FUNDAÇÃO DE ECONOMIA E ESTATÍSTICA (FEE). Árvore de variáveis. Disponível em < <http://dados.fee.tche.br/> >. Acesso em junho de 2017.

GASPAR, N. A.; APARECIDO, L. E. de O.; ROLIM, G. de S.; SOUZA, P. S. de; BOTELHO, T. G. Software for the management of weather stations and for agrometeorological calculations. **Australian Journal of Crop Science**, v.9, n.6, p.545-551, 2015.

GERSTEMBERGER, E.; SOUZA, J. L. M. de; SANTOS, M. de J. dos; ARAUJO, M. A. Estimativa da Produtividade da Cultura do Milho em Diferentes Sistemas de Cultivo na Região de Ponta Grossa-PR, Utilizando Modelos Agrometeorológicos. In: XVIII REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA - Novos Caminhos para Agricultura Conservacionista no Brasil, 2010, Teresina/ PI. **Anais...** Teresina/ PI, 2010.

GOMES, A. C. dos S.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; SOARES, F. C.; PARIZI, A. R. C. Modelo para estimativa da produtividade para a cultura da soja. **Ciência Rural**, v.44, n.1, jan, 2014.

JENSEN, M. E. Water consumption by agricultural plants. In: KOZLOWSKY, T. T. (Ed.). **Water deficits and plant growth**. New York: Academic Press, 1968. p. 1-22.

KÖPP, L. M.; PEITER, M. X.; BEN, L. H. B.; NOGUEIRA, H. M. C. de M.; PADRÓN, R. A. R.; ROBAINA, A. D.; BUSKE, T. C. Simulação da necessidade hídrica e estimativa de produtividade para cultura do milho em municípios do RS. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.14, n.2, p. 235-246, 2015.

KUINCHTNER, A.; BURIOL, G. A. Clima do estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia**. Série: Ciências Exatas, S. Maria, v.2, n.1, p.171-182, 2001.

LIRA, S. A.; NETO, A. C. Coeficientes de correlação para variáveis ordinais e dicotômicas derivados do coeficiente linear de Pearson. **RECIE**, Uberlândia, v. 15, n. 1/2, p. 45-53, 2006.

MALUF, J. R. T.; MATZENAUER, R.; CAIAFFO, M. R. Zoneamento agroclimático da cultura de milho por épocas de semeadura, no estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v.6, n.1, p.39-54, 2000.

MARIN, F. R.; PANDORFI, H.; SENTELHAS, P. C.; CAMARGO, M. B. P. de; HERNANDEZ, F. B. T. Perda de produtividade potencial da cultura do sorgo no estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v.65, n.1, p.157-162, 2006.

MARIN, F. R.; SENTELHAS, P. C.; UNGARO, M. R. G. Perda de rendimento potencial da cultura do girassol por deficiência hídrica, no Estado de São Paulo. **Scientia Agricola**, vol. 57, n.1, Piracicaba, jan./mar. 2000.

MARTINS, M. A. **Estimativa de produtividade das culturas do milho e do sorgo a partir de modelos agrometeorológicos em algumas localidades da região nordeste do Brasil**. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

MATZENAUER, R. et al. **Consumo de Água e Disponibilidade Hídrica para Milho e Soja no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: FEPAGRO, 2002. 104 p. (BOLETIM FEPAGRO, 10).

MATZENAUER, R.; BERLATO, M. A.; SAMPAIO, M. dos R.; TRINDADE, J. K. da. Efeitos do fenômeno Enos sobre a evapotranspiração de referência na região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul, Brasil. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, PORTO ALEGRE, v.14, n.1, p.67-70, 2008.

MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; RIBOLDI, J. Modelos agrometeorológicos para a estimativa do rendimento do milho, em função da

disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 1, n. 2, p. 225-241, 1995.

MATZENAUER, R.; HOMERO, B.; MOACIR, A.B. Evapotranspiração da cultura do milho. I- Efeito de épocas de semeadura. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria. V.6.n.1. p. 9-14.1998.

MINHAS, B. S.; PARIKH, K. S.; SRINIVASAN, T. N. Towards the structure of a production function for wheat yields with dated inputs of irrigation water. **Water Resources Research**, v. 10, n. 3, p. 383-393, 1974.

PARIZI, A. R. C.; ROBAINA, A. D.; GOMES, A. C. DOS S.; SOARES, F. C.; RAMÃO, C. J.; PEITER, M. X.; CALEGARO, L. Efeito de diferentes estratégias de irrigação suplementar sobre a produção de grãos e seus componentes na cultura do milho. **Irriga**, Botucatu, v. 14, n. 3, p. 254-267, julho-setembro, 2009.

PEITER, M.X. **Estudo do Manejo da Irrigação Via Modelo de Simulação**. 1998. 183p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 1998.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Meteorologia Agrícola. ESALQ/USP. 2007. Disponível em: < http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/aulas/leb630/MeteorAgricola_Apostila2007.pdf>. Acesso em abril de 2017.

PRELA-PANTANO, A.; SILVA, D. F. da; DUARTE, A. P. Aplicação de Modelos Agrometeorológicos para Estimativa e Comparativo de Quebra de Produtividade de Milho em Cândido Mota, SP. In: XXIX CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 2012, São Paulo, **Anais...Águas de Lindóia**, 2012. Disponível em: < http://www.abms.org.br/29cn_milho/10438.pdf >. Acesso em junho de 2017.

PRODUTIVIDADE do milho é triplicada em 20 anos. **Press Agrobusiness**, março 2017. Disponível em: < <http://revistapress.com.br/agrobusiness/?p=585> >. Acesso em agosto de 2017.

RADIN, B.; BERGAMASCHI, H.; SANTOS, A. O.; BERGONCI, J. I.; FRANÇA, S. Evapotranspiração da cultura do milho em função da demanda evaporativa atmosférica e do crescimento das plantas. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 9, n. 1-2, p. 7-16, 2003.

RITCHIE, S. W; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. Como uma planta de milho se desenvolve. Ames, Iowa State University of Science and Technology, 1993. 26p. (Relatório Especial, 48).

ROBAINA, Adroaldo Dias. **Estudo Experimental e de Simulação Numérica da Aplicação da Água na Produção das Culturas**. 1992. 144p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 1992.

RODRIGUES, L. R.; SILVA, P. R. F. da. **Indicações técnicas para o cultivo do milho e do sorgo no Rio Grande do Sul: Safras 2011/2012 e 2012/2013.** Porto Alegre: Fepagro, 2011. 140p.

SECCO, D.; ROS, C. O. da; SECCO, J. K.; FIORIN, J. E. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 29: 407-414, 2005.

SEDIYAMA, G. C.; LEAL, B. G.; MANTOVANI, E. C.; COSTA, L. C.; BASTOS, L.N. **Sistema para manejo da água em áreas irrigadas e estimativa do rendimento de culturas agrícolas.** Viçosa: FAPEMIG, Universidade Federal de Viçosa, 2001.

SILVA, D. F. da. **Uso de Modelos Agrometeorológicos de estimativa de produtividade e risco climático da soja na vale do médio Paranapanema – SP.** 2011. 80f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) Instituto Agrônomo, Campinas, SP, 2011.

SILVA, J. C. da; HELDWEIN, A. B.; RADONS, S. Z.; MALDANER, I. C.; TRENTIN, G.; GRIMM, E. L. Necessidade de irrigação para o feijoeiro na região central do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.10, p.1030–1036, 2011a.

SILVA, S. de A.; LIMA, J. S. de S.; OLIVEIRA, R. B. de. Modelo agrometeorológico na estimativa da produtividade de duas variedades de café arábica considerando a variabilidade espacial. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 1, p. 1-10, janeiro-março, 2011b.

SOARES, F. C.; PEITER, M. X.; ROBAINA, A. D.; PARIZI, A. R. C.; RAMÃO, C. J.; VIVAN, G. A. Resposta da produtividade de híbridos de milho cultivado em diferentes estratégias de irrigação. **Irriga**, Botucatu, v. 15, n. 1, p. 36-50, janeiro-março, 2010.

SOLER, C. M. T.; SENTELHAS, P. C.; HOOGENBOOM, G. The impact of El Niño Southern Oscillation phases on off-season maize yield for a subtropical region of Brazil. **International Journal of Climatology**. 30: 1056–1066 (2010).

SOUZA, J. L. M. de; GERSTEMBERGER, E.; ARAUJO, M. A. Calibração de modelos agrometeorológicos para estimar a produtividade da cultura do trigo, considerando sistemas de manejo do solo, em Ponta Grossa-PR. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.4, 409 - 418, 2013.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance.** New Jersey: Laboratory of climatology, 104 p. 1955.(Publication in Climatology, 8).

VIVAN, G. A.; PEITER, M. X.; ROBAINA, A. D.; BARBOZA, F. da S.; BUSKE, T. C. Rendimento relativo da cultura da soja em função da lâmina de irrigação. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 2, p. 282-292, abril-junho, 2013.

WAGNER, M. V.; JADOSKI, S. O.; MAGGI, M. F.; SAITO, L. R.; LIMA, A. dos S. Estimativa da produtividade do milho em função da disponibilidade hídrica em

Guarapuava, PR, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.17, n.2, p.170–179, 2013.

WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

APÊNDICES

APÊNDICE A – PRODUTIVIDADE POTENCIAL DA CULTURA DO MILHO ESTIMADA PELOS MÉTODOS DE MZA E MWa NA REGIÃO DE CRUZ ALTA/ RS

Anos	Setembro		Outubro		Novembro		Dezembro	
	MZA	MW _a	MZA	MW _a	MZA	MW _a	MZA	MW _a
1994	6624,32	18173,47	7252,33	20898,43	7229,45	22557,03	7083,25	22051,08
1995	6704,95	19462,00	7072,29	22281,45	7254,14	22962,91	7026,07	21872,26
1996	6962,95	14776,00	7424,18	17288,79	7476,29	19566,87	7091,42	19623,72
1997	6616,26	17852,57	7121,39	20328,93	7287,05	21365,23	7222,11	19972,33
1998	6350,19	14543,83	6720,40	16452,55	6842,74	17626,09	6658,49	17584,50
1999	6833,95	17031,84	7440,55	20128,83	7558,57	21353,75	7271,13	20466,86
2000	6898,45	15384,20	7342,35	17535,49	7509,20	18044,53	7173,10	18481,47
2001	6737,20	16146,12	7227,78	19185,63	7418,69	20457,98	7197,61	20869,44
2002	6801,70	17108,01	7301,43	19171,56	7550,34	20600,08	7205,78	20081,27
2003	6350,19	18177,09	6802,23	21829,25	7138,95	23474,28	6960,72	23857,10
2004	6696,89	16226,24	7219,59	18574,22	7517,43	18902,75	7483,51	17988,58
2005	6946,83	14653,24	7538,75	16476,89	7583,25	17697,58	7450,83	16540,39
2006	6946,83	15642,97	7432,37	18409,45	7731,35	18895,07	7369,15	18891,24
2007	7067,77	15592,88	7407,82	18363,27	7575,02	19466,80	7254,79	19402,55
2008	6801,70	15864,36	7358,71	18516,10	7698,44	20658,35	7434,50	21830,42
2009	7059,71	19955,60	7497,84	24153,05	7706,67	28164,62	7434,50	33959,24
2010	6487,26	17206,28	6941,35	19805,68	7023,75	21752,01	7050,58	20443,15
2011	6954,89	15647,59	7456,92	18928,00	7484,52	21779,56	7197,61	22641,67
2012	7148,40	16907,52	7710,61	20135,37	7747,81	21192,00	7565,19	21915,47
2013	6785,57	15986,50	7375,08	19613,13	7657,30	22578,18	7164,94	24634,64

APÊNDICE B – PRODUTIVIDADE REAL DA CULTURA DO MILHO ESTIMADA PELO MÉTODO DE JENSEN (1968) NA REGIÃO DE CRUZ ALTA/ RS

Anos	Setembro		Outubro		Novembro		Dezembro	
	MZA	MW _a	MZA	MW _a	MZA	MW _a	MZA	MW _a
1994	7907,60	21694,07	4817,88	13883,29	3945,61	12310,94	4427,03	13781,93
1995	4887,79	14187,45	4174,11	13150,65	4526,03	14327,12	6272,09	19525,10
1996	2732,56	5798,73	1596,69	3718,23	4546,50	11899,06	12693,41	35125,81
1997	4988,91	13461,52	3754,22	10716,90	3145,04	9221,08	4048,47	11195,81
1998	6415,54	14693,50	4785,12	11714,71	5158,88	13288,66	7333,50	19367,16
1999	3102,69	7732,64	2817,62	7622,48	3889,49	10988,22	6133,02	17263,30
2000	2978,15	6641,56	2000,95	4778,81	2286,21	5493,74	3328,03	8574,66
2001	5247,73	12576,52	4808,78	12764,58	6234,98	17193,73	8212,28	23811,48
2002	4004,53	10072,41	3748,25	9841,87	4088,53	11154,99	6081,31	16947,56
2003	5755,78	16475,63	5564,96	17858,67	5714,58	18790,68	5499,29	18848,19
2004	5848,70	14171,12	5812,68	14954,59	4358,72	10960,11	3056,81	7347,84
2005	5726,60	12079,35	3823,40	8356,52	2273,62	5306,11	2447,65	5433,63
2006	4001,25	9010,08	3475,27	8608,01	3956,82	9670,28	4471,85	11463,85
2007	5223,05	11523,07	5361,60	13290,90	4818,92	12383,99	4654,98	12449,50
2008	4901,62	11432,59	3049,41	7672,96	2648,38	7106,78	3578,61	10508,13
2009	3972,66	11229,47	3485,00	11226,35	4200,77	15352,06	5786,84	26433,11
2010	5395,73	14311,20	5950,47	16978,41	6135,28	19000,48	4575,40	13266,36
2011	3423,90	7703,34	4169,75	10584,14	6447,49	18761,88	5393,32	16965,87
2012	3386,41	8009,59	1895,36	4949,51	1820,71	4980,05	3969,37	11498,80
2013	5113,32	12046,75	5176,77	13766,99	5900,81	17399,01	3589,35	12340,98

* com parâmetros recomendados na literatura

Anos	Setembro		Outubro		Novembro		Dezembro	
	MZA	MW _a	MZA	MW _a	MZA	MW _a	MZA	MW _a
1994	5910,45	18970,29	6432,53	20368,48	5316,32	16951,50	4799,97	16454,51
1995	5676,35	18526,01	5378,25	18189,99	5210,24	17908,08	5739,20	18576,65
1996	3489,18	9965,77	4186,78	12163,47	3874,75	11122,47	2881,43	8231,67
1997	5866,85	18163,81	5201,49	16583,77	4453,65	13782,99	4489,66	13731,64
1998	5896,72	15225,31	5719,20	14687,81	5563,66	14897,44	5191,34	13916,16
1999	5532,17	16456,21	5307,80	16625,35	5611,42	18189,25	5062,35	15285,86
2000	4454,67	11964,50	3879,34	10841,81	4242,75	12087,84	4049,83	12374,68
2001	5525,92	14558,02	6654,21	18998,58	6203,75	17977,26	6010,69	17496,43
2002	6018,81	17318,85	6269,56	18825,11	5492,29	16023,37	4215,59	12816,34
2003	6456,43	19438,32	6322,71	20915,09	7319,57	25055,40	6433,80	23007,86
2004	8683,88	24598,57	8512,77	24989,38	8352,08	23268,87	6470,40	17195,61
2005	5156,10	12898,18	5818,45	14778,31	6348,30	18795,23	5213,32	13905,44
2006	5180,43	13195,17	5715,10	15908,49	7289,87	21503,09	5982,44	16808,10
2007	7915,03	20080,95	7981,65	22287,25	7870,25	22521,43	6467,27	18705,61
2008	4552,37	12713,89	4963,92	14456,48	5498,97	17961,27	4916,13	16503,31
2009	5618,07	18678,80	5817,61	21729,90	5511,73	22367,91	4931,02	24005,74
2010	6932,91	19864,96	7688,03	23438,53	8121,75	26770,60	7041,81	21124,02
2011	7923,09	22471,42	9808,89	30780,59	9274,69	28654,83	4961,76	16779,42
2012	4413,97	12960,88	3673,04	11619,17	3862,22	12754,57	3467,10	11935,90
2013	7802,11	21480,80	8486,63	25244,54	11006,65	36587,15	7848,32	29604,36

* utilizando parâmetros ajustados com os dados da região de Cruz Alta/ RS

APÊNDICE C – PRODUTIVIDADE REAL DA CULTURA DO MILHO ESTIMADA PELO MÉTODO DE MINHAS, PARIKH E SRINIVASAN (1974) NA REGIÃO DE CRUZ ALTA/ RS

Anos	Setembro		Outubro		Novembro		Dezembro	
	MZA	MW _a	MZA	MW _a	MZA	MW _a	MZA	MW _a
1994	6101,98	16740,45	6684,81	19263,05	6275,00	19579,00	6359,43	19797,74
1995	6290,10	18257,83	6394,51	20146,10	6620,29	20956,47	6309,79	19642,46
1996	4881,53	10359,03	4485,43	10445,27	5139,06	13449,89	5370,83	14862,43
1997	6171,79	16653,26	6145,40	17542,83	5928,80	17382,91	5845,02	16164,06
1998	6053,21	13863,66	6445,85	15780,42	6531,48	16824,32	6296,71	16629,09
1999	5760,20	14355,80	5892,09	15939,79	5608,22	15843,81	5514,15	15521,29
2000	5674,99	12655,77	5168,72	12344,28	4931,67	11850,75	4753,15	12246,48
2001	6398,70	15334,88	6785,32	18011,15	6956,36	19183,04	6814,26	19757,91
2002	6243,10	15702,99	6282,65	16496,53	6340,80	17300,02	6192,96	17258,73
2003	6298,49	18029,09	6696,46	21489,82	6894,05	22669,03	6721,83	23038,31
2004	6416,45	15546,76	6705,27	17251,00	6499,87	16344,09	6047,07	14535,73
2005	6192,81	13062,76	6210,44	13573,69	5462,50	12748,23	4758,55	10563,69
2006	6264,81	14107,20	6322,22	15659,69	6134,19	14991,68	5506,06	14115,11
2007	6730,19	14848,12	6893,25	17087,71	6785,82	17438,65	6304,48	16860,99
2008	5897,95	13756,43	5818,72	14641,13	5639,15	15132,35	4852,94	14250,03
2009	6266,84	17714,43	6114,30	19696,22	6272,75	22924,24	5883,49	26874,55
2010	6376,81	16913,34	6796,91	19393,55	6804,11	21071,78	6533,44	18943,72
2011	5950,72	13388,34	6243,14	15847,05	6105,67	17767,20	6446,06	20277,52
2012	5790,26	13695,24	5027,46	13128,64	4465,30	12213,61	4135,73	11980,72
2013	6318,73	14886,63	6858,51	18239,37	6672,71	19675,05	6176,75	21237,06

* com parâmetros recomendados na literatura

Anos	Setembro		Outubro		Novembro		Dezembro	
	MZA	MW _a	MZA	MW _a	MZA	MW _a	MZA	MW _a
1994	5923,17	17787,66	6874,31	20771,92	6089,16	18923,17	5278,17	17491,11
1995	6059,67	18474,11	5850,39	19023,23	5785,05	19103,19	6413,04	20175,90
1996	3384,67	9106,28	4016,43	11323,91	3927,64	11063,54	3223,69	8729,25
1997	6307,35	18225,99	5805,24	17695,50	5253,41	15606,63	4967,53	14672,66
1998	6135,01	14854,99	6278,66	15584,91	6144,72	15998,95	5909,95	15515,84
1999	5643,11	15762,45	5919,39	17571,37	5904,94	18369,83	5774,32	16785,41
2000	4568,58	11503,37	4296,20	11489,55	4387,61	12013,91	4429,05	13326,24
2001	5997,64	14852,51	6912,42	18873,40	6494,58	18255,55	6587,87	18872,59
2002	6365,32	17249,50	6690,79	19010,95	6074,04	17004,09	4798,54	14127,64
2003	6451,36	18683,27	6695,18	21614,73	7231,34	24060,93	6848,40	23850,77
2004	8973,77	24017,65	8551,75	24371,29	8113,39	21740,19	6968,37	17841,07
2005	5584,06	13041,62	6428,25	15861,53	7389,35	21841,32	5971,85	15830,65
2006	5528,83	13212,13	6255,46	16512,50	7608,47	21810,07	6967,05	19072,57
2007	8471,32	20316,60	8080,08	21569,26	8025,21	22051,72	7228,45	20332,65
2008	4863,58	12622,75	5331,84	14836,59	5997,23	19103,08	5654,69	18533,68
2009	6074,59	18948,39	6090,10	21753,20	5826,32	22627,06	5588,28	26143,50
2010	6873,39	18739,47	7308,58	21363,65	7615,40	24233,35	7192,78	21091,84
2011	8485,32	22679,62	10667,14	32417,26	11255,19	34048,32	5655,42	18521,02
2012	4790,62	13317,45	3894,28	11838,02	3904,52	12415,08	3643,82	12294,12
2013	7319,73	18615,98	8329,44	23468,49	10856,77	34798,71	8340,41	30684,00

* utilizando parâmetros ajustados com os dados da região de Cruz Alta/ RS

APÊNDICE D – PRODUTIVIDADE REAL DA CULTURA DO MILHO ESTIMADA PELO MÉTODO DE DOORENBOS E KASSAN (1979) NA REGIÃO DE CRUZ ALTA/ RS

Anos	Setembro		Outubro		Novembro		Dezembro	
	MZA	MW _a	MZA	MW _a	MZA	MW _a	MZA	MW _a
1994	4564,95	12523,71	4443,27	12803,80	4451,96	13890,81	4011,26	12487,56
1995	4293,17	12461,49	4619,73	14554,60	4284,46	13562,41	4089,06	12729,31
1996	1890,93	4012,72	2214,95	5157,98	2497,87	6537,40	3163,52	8754,24
1997	4108,64	11086,31	3681,64	10509,71	3617,62	10606,67	2771,20	7663,60
1998	4564,10	10453,16	4954,93	12130,41	4900,69	12623,60	4656,98	12298,68
1999	3522,55	8779,03	3045,17	8238,05	2415,66	6824,50	2748,39	7736,20
2000	2975,95	6636,65	2400,64	5733,38	1770,71	4254,99	1668,38	4298,59
2001	4653,59	11152,62	5109,55	13562,95	5106,65	14082,22	5248,84	15218,99
2002	4049,46	10185,42	3634,21	9542,43	3737,33	10196,81	3695,24	10298,01
2003	5498,43	15738,98	5548,02	17804,31	5465,71	17972,36	5284,64	18112,50
2004	4933,37	11953,32	4507,83	11597,52	4173,04	10493,21	3188,62	7664,68
2005	3760,83	7932,89	3558,69	7777,95	2330,73	5439,40	1601,65	3555,57
2006	3954,79	8905,44	3700,09	9164,86	2860,76	6991,56	2619,26	6714,63
2007	4824,74	10644,33	4674,82	11588,44	4288,03	11019,66	3972,23	10623,52
2008	3289,63	7672,77	3090,40	7776,11	2391,75	6418,13	1595,71	4685,60
2009	3649,22	10315,21	3565,73	11486,43	3254,39	11893,42	2812,15	12845,34
2010	5260,69	13953,04	5587,15	15941,74	5307,91	16438,18	4642,50	13460,93
2011	3609,26	8120,37	3278,37	8321,54	3684,44	10721,53	3953,72	12437,29
2012	2856,11	6755,33	2139,26	5586,43	1267,67	3467,36	827,09	2395,97
2013	4837,83	11397,71	4639,65	12338,58	4162,97	12274,87	4418,04	15190,22

* com parâmetros recomendados na literatura

Anos	Setembro		Outubro		Novembro		Dezembro	
	MZA	MW _a	MZA	MW _a	MZA	MW _a	MZA	MW _a
1994	5044,37	16822,05	5438,80	19428,45	5709,61	21336,83	5466,15	20803,99
1995	4854,63	17787,48	5488,92	20878,25	5629,13	21639,32	5480,03	20680,02
1996	3071,70	12201,42	4061,10	15085,83	4752,10	17732,32	5023,77	18206,34
1997	4692,42	16234,08	4900,69	18545,76	5279,14	19850,42	4879,15	18367,27
1998	4979,90	13565,34	5580,61	15667,65	5780,05	16921,74	5604,89	16895,23
1999	4293,44	15057,76	4602,89	17969,46	4744,37	19308,03	4890,36	18806,78
2000	3889,11	13291,79	4151,98	15392,22	4369,10	16102,96	4275,42	16632,02
2001	5138,66	14951,68	5860,25	18164,55	6153,54	19560,27	6171,78	20132,62
2002	4690,18	15452,13	4933,87	17422,91	5463,86	19135,30	5357,83	18805,54
2003	5696,72	17593,90	5992,51	21098,32	6223,35	22699,61	6078,43	23108,00
2004	5343,91	15204,16	5468,88	17307,25	5687,38	17718,69	5222,68	16642,35
2005	4502,53	13045,73	4969,22	14897,16	4709,07	15971,63	4371,82	14847,17
2006	4651,33	14031,35	5022,81	16730,63	5066,16	17219,06	4868,81	17303,41
2007	5346,92	14409,18	5643,39	17132,96	5776,38	18277,44	5526,85	18257,76
2008	4107,24	13904,93	4603,09	16565,71	4794,62	18653,33	4360,96	19594,73
2009	4443,18	17649,62	4959,27	21852,79	5270,38	25873,63	5001,30	31205,98
2010	5546,24	16428,10	6067,08	19103,99	6084,85	21003,82	5782,96	19532,67
2011	4388,13	13847,08	4759,25	17001,87	5405,11	20222,59	5490,02	21311,02
2012	3855,36	14479,12	4113,74	17493,28	4201,88	18696,37	4018,25	19370,13
2013	5291,26	14888,86	5609,09	18292,08	5745,21	21127,47	5718,97	23403,09

* utilizando parâmetros ajustados com os dados da região de Cruz Alta/ RS