

IDENTIFICAÇÃO DE ESTIAGENS E ESTIMATIVAS DE PRODUTIVIDADE DE MILHO PARA O MUNICÍPIO DE CAMPOS NOVOS, SANTA CATARINA

ALVES, Maikon Passos – maiconpassos@gmail.com
Universidade Federal de Santa Catarina / UFSC

MINUZZI, Rosandro Boligon - rbminuzzi@hotmail.com
Universidade Federal de Santa Catarina / UFSC

CARON, Matheus Luís - matheuscaron@outlook.com
Universidade Federal de Santa Catarina / UFSC

Submetido em: 17/08/2020

Aceito para publicação em: 02/02/2021

Publicado em: 06/04/2021

DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v28i0.75917>

RESUMO: O presente estudo visou analisar índices que possam ser utilizados para identificação de períodos de estiagem, bem como estimar a produtividade de milho para o município de Campos Novos, Santa Catarina, Brasil. Foram utilizados dados de precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e insolação no período de setembro de 2003 a março de 2020, oriundos da estação meteorológica de Campos Novos, e de setembro de 2019 a março de 2020 para as localidades catarinenses de Tangará, Curitibanos, Água Doce, Canoinhas e São Bento do Sul. Os dados de produtividade de milho são provenientes das safras de 2003/04 a 2017/18 referentes ao município de Campos Novos. Foi realizado o balanço hídrico sequencial de cada ano agrícola para diferentes datas de semeadura de 1o de setembro a 15 de novembro, espaçadas de 15 em 15 dias. Os índices utilizados foram o ETR/ETc (evapotranspiração real/evapotranspiração máxima da cultura), CWSI (Índice de estresse hídrico da cultura), Pef (precipitação efetiva), Pef-ETc, DEF (déficit hídrico) e EXC (excesso hídrico). Por meio da análise de Componentes Principais obtiveram-se as correlações entre os índices e estes, com a produtividade de milho nas safras de 2006 a 2017 em Campos Novos. As equações de estimativa de produtividade do milho foram obtidas através da regressão linear simples ao nível significância de 5% ou 1% pelo valor-p. A avaliação da estimativa de produtividade com os índices foi realizada por meio do erro padrão da estimativa, do erro médio, dos coeficientes de correlação e de determinação da regressão linear, do índice de concordância e do índice de confiança. A ETR/ETc, EXC, Pef, CWSI e DEF podem ser usados na identificação de períodos de estiagens ou mais chuvosos. Porém, os dois últimos índices estão mais associados com a redução na produtividade de milho decorrente de estiagem, principalmente em semeaduras feitas na segunda quinzena de outubro na região de Campos Novos. O uso do CWSI, ETR/ETc e DEF para estimar a produtividade de milho apresentaram um 'ótimo' desempenho, podendo ser utilizadas como variáveis preditoras.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem agrometeorológica; Índice de seca; balanço hídrico do solo

IDENTIFICATION OF DROUGHT AND MAIZE YIELD ESTIMATES FOR THE COUNTY OF CAMPOS NOVOS, SANTA CATARINA

ABSTRACT: This study aims to analyze the suitability of indexes for use in the identification of dry seasons and in the estimation of maize yields for the municipality of Campos Novos, State of Santa Catarina, Brazil. The analysis drew on rainfall, air temperature, relative humidity, wind speed and insolation data collected from September 2003 to March 2020, from the weather station located in Campos Novos, and another period from September 2019 to March 2020 for the surrounding localities of Tangará, Curitibanos, Água Doce, Canoinhas and São Bento do Sul, in the state of Santa Catarina.

The maize yield data came from the 2003/04 to 2017/18 harvests of the municipality of Campos Novos. Each agricultural year was evaluated for its sequential water balance of different sowing dates within the period from September 1 to November 15, spaced every 15 days. The indices used were ETR/ETc (crop's actual evapotranspiration/maximum evapotranspiration), CWSI (crop's water stress index), Pef (effective rainfall), Pef-ETc, DEF (water deficit), and EXC (water excess). Principal Component Analysis was applied to correlate the indices, which in turn were obtained with the maize yields from the 2006 to 2017 harvests in Campos Novos. The equations for maize yield estimation were obtained through simple linear regression at a significance level of 0.05 or 0.01 by the p-value. The yield estimates with the indices were evaluated by using the standard error of the estimate, the average error and correlation coefficients, and by determining linear regression, index of agreement and confidence index. It was found that the ETR/ETc, EXC, Pef, CWSI and DEF indices can be used to identify both dry and rainy periods. However, the latter two indices showed to be more associated with maize yield decrease due to dry seasons, mainly in sowings from the second half of October around Campos Novos. The CWSI, ETR/ETc and DEF indices performed greatly regarding the maize yield estimates and proved suitable for use as predictor variables.

KEYWORDS: Agrometeorological modeling; Drought index; Soil water balance.

IDENTIFICACIÓN DE ESTIAGIAS Y ESTIMACIONES DE PRODUCTIVIDAD DE MAÍZ PARA EL MUNICIPIO DE CAMPOS NOVOS, SANTA CATARINA

RESUMEN: El presente estudio tuvo como objetivo analizar índices que se puedan utilizar para identificar períodos de estiaje, así como estimar la productividad del maíz para el municipio de Campos Novos, Santa Catarina, Brasil. Se utilizaron datos de precipitación, temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento e insolación, recolectados de septiembre de 2003 a marzo de 2020, de la estación meteorológica ubicada en Campos Novos, y de septiembre de 2019 a marzo de 2020 para las localidades catarinenses de Tangará, Curitibanos, Água Doce, Canoinhas y São Bento do Sul. Los datos de productividad del maíz provinieron de las cosechas 2003/04 a 2017/18 del municipio de Campos Novos. El balance hídrico secuencial de cada año agrícola se realizó para diferentes fechas de siembra, del 1 de septiembre al 15 de noviembre, espaciadas cada 15 días. Los índices utilizados fueron ETR/ETc (evapotranspiración real/evapotranspiración máxima del cultivo), CWSI (índice de estrés hídrico del cultivo), Pef (precipitación efectiva), Pef-ETc, DEF (déficit hídrico) y EXC (exceso de agua). A través del Análisis de Componentes Principales se obtuvieron las correlaciones entre los índices, que a su vez se obtuvieron con la productividad del maíz de las cosechas de 2006 a 2017 en Campos Novos. Las ecuaciones para estimar la productividad del maíz se obtuvieron mediante regresión lineal simple al nivel de significancia de 5% o 1% por el valor p. La estimación de productividad con los índices se evaluó mediante el error estándar de la estimación, el error promedio, los coeficientes de correlación, así como mediante la determinación de la regresión lineal, el índice de concordancia y el índice de confianza. Se verificó que los índices ETR/ETc, EXC, Pef, CWSI y DEF pueden usarse para identificar tanto los períodos de estiaje como los lluviosos. Sin embargo, los dos últimos índices están más asociados a la reducción de la productividad del maíz debido al estiaje, principalmente en la siembra de la segunda quincena de octubre en la región de Campos Novos. Se observó un desempeño excelente de los índices CWSI, ETR/ETc y DEF para la estimación de la productividad del maíz, los cuales pueden utilizarse como variables predictoras.

PALABRAS CLAVE: Modelización agrometeorológica; Índice de sequía; equilibrio hídrico del suelo

INTRODUÇÃO

A região Sul do Brasil, em especial o estado de Santa Catarina, mesmo compreendida nos domínios da zona extratropical, com precipitação regular e

bem distribuída, comparada às outras regiões, é afetada por episódios de estiagem que, por vezes, ocasionam danos e, ou, prejuízos socioeconômicos (HERRMANN, 2014, SPINELLI et al., 2020).

De acordo com a *Sociedade Meteorológica Americana*- AMS (2013) a estiagem resulta de uma complexa interação entre os fatores naturais e sociais. Sendo resultado das interações entre a deficiência de precipitação ou evapotranspiração excessiva durante um determinado período de tempo e, a demanda pelo uso da água. Spinelli et al. (2020, p.346) consideram estiagem, para a região sul do Brasil, um período de redução nas condições normais da precipitação e, ou, excessos de evapotranspiração que geram impactos socioeconômicos. Sendo assim, uma interação entre os aspectos físicos locais/regionais e a gestão do uso da água.

Dados do *Centre for Research Epidemiology of Disaster* (CRED), por meio do *International Disasters Database* (EM-DAT), estimaram perdas de 11 bilhões de dólares em decorrência dos eventos de estiagem, prejudicando aproximadamente 50 milhões de habitantes no Brasil, entre os anos de 1991 e 2010 (LINHEIRA, 2016). Para Santa Catarina, Herrmann (2014) identificou entre 1980 a 2010, 1534 decretos municipais de Estado de Emergência e Calamidade Pública, provocados pelos episódios de estiagem. Herrmann e Alves (2014) apontam que entre 2000 a 2010 as estiagens em Santa Catarina provocaram prejuízos econômicos que ultrapassaram 4 bilhões de reais. Sendo que, os anos de maiores perdas financeiras foram os de 2007 e 2008 com aproximadamente um bilhão setecentos e sete milhões de reais e dois bilhões cento e treze milhões de reais, respectivamente.

Do ponto de vista dos impactos, tais episódios de estiagem, concentram-se no setor agropecuário, o que resulta em perda de produtividade (SPINELLI, 2018; SPINELLI et al., 2020). A produção de grãos, principalmente a de milho é a mais afetada em períodos de estiagem, ocasionando elevação do preço do produto o que impacta o custo da produção de outros setores, como a suinocultura, avicultura e bovinocultura (VENÂNCIO, 2014; SPINELLI, 2018).

O milho é uma das culturas com distribuição geográfica mais abrangente no País, o que se deve ao fato de ser uma cultura anual de estação quente, com ampla variabilidade segundo sua precocidade (MINUZZI, 2006; BERGANASCHI; MATZENAUER, 2014). Proporcionalmente, Santa Catarina é um dos maiores produtores de milho do Brasil, com uma área cultivada que oscilou entre 330 mil e 443 mil hectares (ha), e produziu entre 2.530 milhões e 3.149 milhões de toneladas (t), nos últimos 5 anos (safras de 2014 a 2018), sendo Campos Novos, o município com maior produção deste cereal no Estado (IBGE, 2020). Sua importância também é dada nos aspectos social e econômico, pois é produzido por aproximadamente 150 mil famílias rurais, em sua grande maioria pequenos e médios produtores, além de ser importante insumo para a suinocultura, avicultura e bovinocultura de leite, que são setores fundamentais para a agroindústria catarinense, geradora de empregos na área urbana (NASCIMENTO, 2014).

Nied et al. (2005) apresentaram resultados de diferentes pesquisas demonstrando que a precipitação pluvial é a principal variável climática que, ao longo dos anos, tem determinado as variações na produção de grãos da maioria das culturas na região Sul do Brasil. Em geral, as condições hídricas são as que mais afetam a produção das lavouras de milho no território brasileiro. A

produção nacional de milho teve elevadas reduções nas safras de 1995/96, 1996/97, 1998/99, 1999/00 e 2004/05, em consequência de estiagens (BERGANASCHI; MATZENAUER, 2014). Petry et al. (2007) seguem esses raciocínios ao observarem que, em anos secos o déficit hídrico ocasionou impactos expressivos sobre as plantas de milho reduzindo seu desenvolvimento e produtividade, em lavouras não irrigadas. Doubrawa (2007) descreve que as estiagens podem estar relacionadas com o uso intensivo do solo pelas atividades agropecuárias sem o uso de técnicas de conservação do solo e dos recursos hídricos, além disso, o adensamento da malha viária, urbana e agroindustrial favorecem o escoamento superficial da água no solo e o desabastecimento das nascentes. Isso faz com que a demanda por recursos hídricos aumente e favoreça a instalação da crise por falta de água.

As estiagens são fenômenos complexos e que costumam gerar grandes impactos, fazendo com que seja necessário o desenvolvimento de métodos capazes de identificá-las e caracterizá-las (FERNANDES, et al., 2009). Nessa questão, os índices de secas e, ou, estiagens aparecem como uma importante ferramenta na integração de diferentes variáveis relacionadas ao fenômeno (STEINEMANN et al., 2005). Vários métodos e índices têm sido desenvolvidos para a avaliação e quantificação da estiagem, considerando diferentes variáveis de causa e resposta, tais como precipitação, umidade do solo, evapotranspiração e condição da vegetação (BHUIYAN et al., 2006, FERNANDES, et al., 2009; ABBAS et al., 2014).

Tian et al. (2018) avaliaram a performance de seis índices de seca como indicadores na variação da produtividade agrícola no centro-sul dos Estados Unidos e concluíram que o melhor índice depende do tipo e do estágio fenológico da cultura. No entanto, quando consideraram as condições do tempo e a produtividade anual como 'acima' ou 'abaixo da normalidade', todos os índices de seca tiveram uma alta correlação com a produtividade.

Na hipótese de se almejar em melhorar ainda mais o desempenho na estimativa de produtividade de milho em Campos Novos, Dallacort et al. (2006) sugerem que os modelos matemáticos baseados em princípios agroclimatológicos mais importantes, são aqueles que simulam as fases de desenvolvimento e de maturação das culturas, a disponibilidade de umidade no solo e os efeitos do estresse hídrico no rendimento. Para os autores, os modelos são dinâmicos e funcionais haja vista que descrevem mudanças diárias nas variáveis da cultura, considerando os principais processos morfofisiológicos que nela ocorrem.

A quantificação e identificação de regiões afetadas pelos eventos de estiagens são importantes para o planejamento de atividades e tomadas de decisão, especialmente as ligadas ao setor agrícola, já que a produtividade das culturas é diretamente influenciada pela ocorrência de estiagem em determinada região. Desta forma, o uso dos índices de estiagem ou de seca, pode contribuir na estimativa dos prejuízos causados por estes eventos meteorológicos e no planejamento e tomada de decisão quanto à mitigação dos seus efeitos.

Nesse sentido, o presente estudo teve como objetivo definir índices que possam ser utilizados para identificar períodos de estiagens e estimar a produtividade de milho no município de Campos Novos.

MATERIAIS E MÉTODOS

DADOS UTILIZADOS

Foram utilizados dados diários de precipitação (mm), temperatura mínima, máxima e média do ar (°C), umidade relativa (%), velocidade do vento (m/s) e insolação (horas) de setembro de 2003 a março de 2020, provindos da estação meteorológica de Campos Novos. As mesmas variáveis meteorológicas de outras seis estações (Tangará, Curitibaanos, Água Doce, Canoinhas e São Bento do Sul) localizadas em Santa Catarina também foram utilizadas (Figura 1), mas do período de setembro de 2019 a março de 2020, sendo todas estações pertencentes a Empresa de Pesquisa e Extensão Rural de Santa Catarina/Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (Epagri/Ciram).

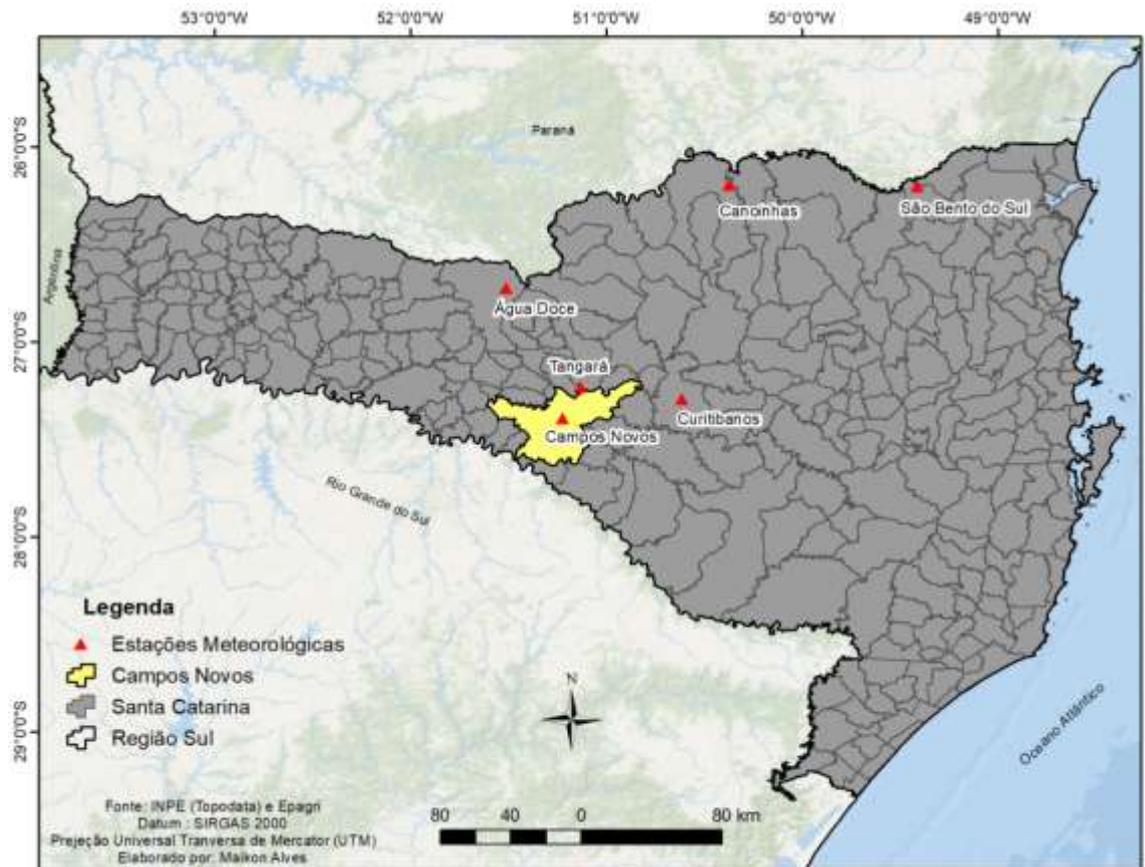


Figura 1 – Localização do município de Campos Novos e das estações meteorológicas utilizadas no estudo.

Dados de produtividade de milho de Campos Novos, das safras de 2003/04 a 2017/18 foram obtidos da base de dados do Sistema IBGE de Recuperação Automática (IBGE-SIDRA) e das safras 2018/19 e 2019/20 do Centro de Socioeconomia e Planejamento Agrícola (CEPA), da Epagri. Os dados de produtividade foram inicialmente submetidos ao teste de *Mann-Kendall*, onde constatou-se tendência de aumento estatisticamente significativa a 1%, devido ao efeito de tecnologias incorporadas no sistema de produção da cultura no

decorrer do período analisado. Assim, para retirar a tendência tecnológica dos dados de produtividade daquele decorrente da variabilidade climática interanual, utilizou-se a Equação 1.

$$Y = Y_i - (Y_{ix} - Y_o) \quad (1)$$

onde, Y , Y_i , Y_{ix} , Y_o , são a produtividade do ano i corrigido, a produtividade original do ano i , a produtividade do ano i estimado pelo modelo de regressão linear e a produtividade do primeiro ano da série histórica estimada pelo modelo de regressão, respectivamente.

O comparativo dos dados originais de produtividade de milho em Campos Novos com aqueles sem o efeito da tecnologia é ilustrado na Figura 2, onde fica evidente a tendência de aumento dos dados originais de produtividade e a sua ausência pelas linhas de tendência.

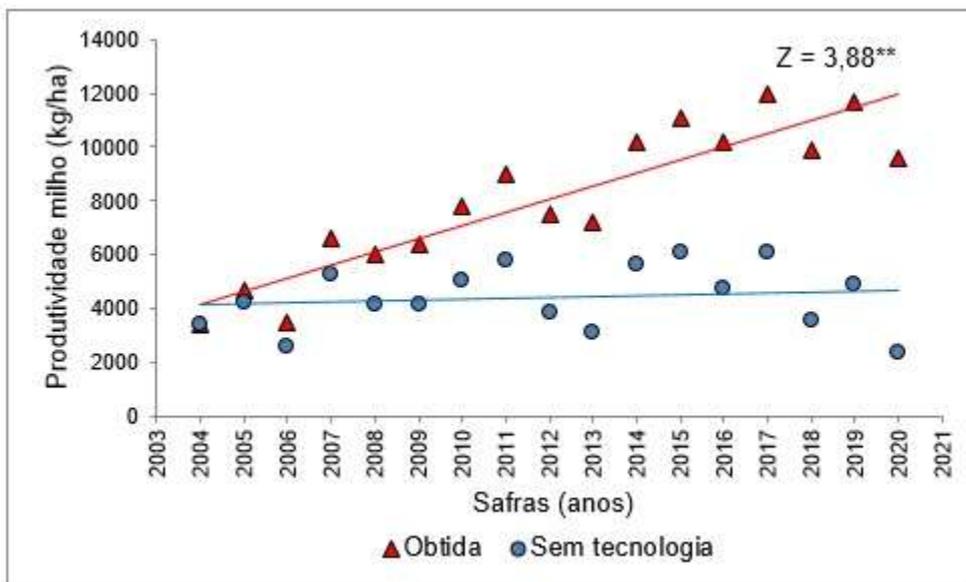


Figura 2 – Produtividade de milho (kg/ha) no município de Campos Novos obtida pelo IBGE e sem a tendência tecnológica com suas respectivas linhas de tendência. ** Significativo a 1%.

ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados meteorológicos foram utilizados para realizar o balanço hídrico sequencial de cada ano agrícola para diferentes datas de semeadura de 1º de setembro a 15 de novembro, espaçadas de 15 em 15 dias. A evapotranspiração de referência (ET_o) necessária no balanço hídrico foi estimada usando o método de *Penman-Monteith* padrão FAO-1998 e a precipitação foi a efetiva (P_{ef}), a qual considerou-se 85% do total registrado diariamente pelos pluviômetros. Eventualmente, na ausência de algum dado meteorológico necessário para ET_o , esta foi obtida usando os dados de temperatura do ar e as demais variáveis estimadas de acordo com o proposto por Allen et al. (1998). Com os componentes do balanço hídrico obtiveram-se os índices utilizados neste estudo, a saber: ETR/ET_c (evapotranspiração real/evapotranspiração máxima da cultura), $CWSI$ (Índice de estresse hídrico da cultura), $P_{ef}-ET_c$, DEF (déficit

hídrico) e *EXC* (excesso hídrico), além da *Pef*. Os coeficientes de cultura (*Kc*) necessários para determinar a *ETc* do milho em suas diferentes fases fenológicas (duração entre parênteses) foram os seguintes: inicial: 0,45 (20 dias); desenvolvimento vegetativo: 0,7 (30 dias); florescimento e formação de grãos: 1,05 (50 dias); e maturação: 0,55 (20 dias) (DOORENBOS; KASSAN, 2000).

O *CWSI* é um método teórico em que a resposta de cultura agrícola é baseada na razão entre *ETR* e a *ETc* que é representada por *Z*, conforme Equação 2:

$$Z = \left[\left(\frac{ARM}{CAD} \right) - \left(\frac{ETR}{ETc} \right) \right] \quad (2)$$

onde, *ARM*, é o armazenamento de água no solo; *CAD* é a capacidade máxima de água disponível (mm), variável em função do tipo de textura do solo, a qual considerou-se de textura média. Assim, em função da textura do solo e da profundidade média efetiva do milho usou-se o *CAD* igual a 50mm. O cálculo do *CWSI* é obtido por: $CWSI = 1 - Z$.

Os valores do *CWSI* são interpretados conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação da condição hídrica da cultura em função do *CWSI*.

CWSI	Condições de satisfação hídrica
0 = $CWSI \leq 0,1$	Ótimas
0,1 < $CWSI \leq 0,2$	Favoráveis
0,2 < $CWSI \leq 0,4$	Adequadas
0,4 < $CWSI \leq 0,6$	Razoáveis
0,6 < $CWSI \leq 0,8$	Desfavoráveis
0,8 < $CWSI \leq 1,0$	Críticas

A análise de Componentes Principais (ACP) foi usada para examinar as correlações entre os índices e, estes, com a produtividade de milho nas safras de 2006 a 2017 em Campos Novos, além de eliminar aqueles índices que exercem pouca variação, no grupo de indivíduos analisados. Essa metodologia estatística também foi usada no estudo da recente estiagem de 2019/20 ocorrida no sul do Brasil, onde as componentes principais foram relativas aos índices determinados para cada estação meteorológica usada no estudo (Figura 1).

Com a regressão linear simples (RLS) foram obtidas as equações para estimativa de produtividade de milho (variável dependente *Y*) em Campos Novos, desde que, significativas ao nível de 5% ou 1% pelo *valor-p*, tendo os índices como dados de entrada (variável independente *X*). A série usada para a correlação entre as variáveis foi das safras 2006 a 2017, enquanto as demais safras (2004, 2005, 2006, 2018, 2019 e 2020) foram utilizadas para validar as estimativas de produtividade das equações estatisticamente significativas.

Para todas as análises estatísticas previamente destacadas, os índices de cada safra de milho foram obtidos pelas médias dos valores calculados para cada uma das seis datas de semeadura previamente destacadas.

A avaliação da estimativa de produtividade com os índices e com a produtividade observada foi realizada por meio do erro padrão da estimativa (EPE), do erro médio (EM), dos coeficientes de correlação (r) e de determinação (R^2) da regressão linear, do índice de concordância (d) e do índice de confiança (c). O Índice de Concordância (d) (WILLMOTT, 1985) é descrito pela Equação 3.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|Y_i - \bar{Y}| + |X_i - \bar{X}|)^2} \right] \quad (3)$$

em que, X_i = são os valores de produtividade observada; \bar{X} = é a média dos valores de produtividade observada; Y_i = são os valores estimados de produtividade; e N = é o número de dados de produtividade usados na avaliação. Analogamente, para a análise da confiabilidade de produtividade estimada pelos índices, considerou-se o Índice de Confiança (c), proposto por Camargo e Sentelhas (1997), conforme Equação 4. O critério adotado para interpretar os valores de c , consta na Tabela 2.

$$c = r \cdot d \quad (4)$$

Tabela 2 - Critério de interpretação do índice de confiança.

Índice de confiança (c)	Desempenho
> 0,86	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

O erro padrão da estimativa (EPE), foi calculado utilizando-se a Equação 5:

$$EPE = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}{N-1} \right)^{1/2} \quad (5)$$

O Erro Médio (EM) representa a diferença média de produtividade observada e as produtividades estimadas pelos índices. Assim, o EM indica a possível tendência de produtividade estimada em superestimar ($EM > 0$) ou subestimar ($EM < 0$) a produtividade observada, sendo calculado conforme Equação 6. O teste t Student foi usado para avaliar a existência ou não de diferença significativa ao nível de 5% ou 1% entre as produtividades estimadas e observadas.

$$EM = \sum_{i=1}^N (Y_i - X_i) \quad (6)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nos resultados obtidos pela técnica dos componentes principais (CP), os respectivos autovalores e porcentagens da variância explicada por cada

CP estão apresentados na Tabela 3. Os dois primeiros componentes principais foram responsáveis por 93,06% da variação total, sobre os índices e a produtividade obtidos para 11 safras (2006 a 2017) de milho em Campos Novos. Rencher (2002) destaca que pelo menos 70% da variação acumulada deve ser explicada pelos dois primeiros CPs. Como somente a primeira CP (CP1) respondeu por 80% da variação amostral total, esta foi utilizada prioritariamente para o estudo do conjunto de dados.

Tabela 2 - Componentes principais (CP), autovalores e porcentagem da variância explicada e proporção acumulada (%) pelos componentes.

Componente principal (CP)	Variância (Autovalores)	% da variância de CP	% acumulada da variância de CP
CP1	5,6022	80,03	80,03
CP2	0,912	13,03	93,06
CP3	0,3184	4,55	97,61
CP4	0,1528	2,18	99,79
CP5	0,012	0,17	99,96
CP6	0,0024	0,03	99,99
CP7	0,0002	0	100

Para se entender a importância de cada variável na construção do primeiro CP foi calculada a correlação entre as variáveis originais e a componente principal. Assim, na CP1 destacaram-se as variáveis *ETR/ETc*, *EXC* e *Pef*. Assim como ficou evidente o contraste entre essas três variáveis com *CWSI* e *DEF* (Tabela 4). Isto significa que quando deseja-se realizar estudos com os referidos índices, pode-se utilizar algum dos três primeiros (*ETR/ETc*, *EXC* e *Pef*) ou algum dos dois últimos citados (*CWSI* e *DEF*).

Tabela 4 - Coeficientes de ponderação e de correlação das variáveis padronizadas com os dois primeiros componentes principais (CP).

Variável	Coeficientes de ponderação		Coeficientes de correlação	
	CP1	CP2	CP1	CP2
CWSI (X₁)	-0,4141	-0,0012	-0,9802	-0,0012
ETR/ETc (X₂)	0,4057	0,1879	0,9603	0,1795
Pef-ETc (X₃)	-0,3504	0,3169	-0,8294	0,3026
DEF (X₄)	-0,4134	-0,1224	-0,9784	-0,1169
EXC (X₅)	0,3878	-0,3534	0,9178	-0,3374
Pef (X₆)	0,4053	-0,1853	0,9594	-0,177
Y (X₇)	0,2357	0,8307	0,5579	0,7933

Associando os resultados da Tabela 4 com o Biplot de CP1 x CP2, percebe-se que os anos de 2010, 2015 e 2016 apresentaram os maiores valores de *ETR/ETc*, *EXC* e *Pef*, isto é, foram os anos menos secos pela CP1. Na contrapartida, os anos de 2009, 2012 e 2013 tiveram os menores escores para o *CWSI* e *DEF*, mas como possuem uma correlação negativa, significa a ocorrência dos anos mais secos pela CP1, ou seja, com os maiores *CWSI* (quanto maior, mais seco) e *DEF*. Enquanto os anos mais secos identificados pelo *CWSI* e *DEF* estiveram associados com as menores produtividades, os anos menos secos identificados por *ETR/ETc*, *EXC* e *Pef*, não refletiram rigorosamente

nas maiores produtividades de milho. A exceção foi o ano de 2015, dentro do período analisado de 2007 a 2017. Isto pode ser justificado que anos mais úmidos, também podem reduzir a produtividade se a chuva for em excesso, logicamente, não numa proporção tão elevada quanto em decorrência de uma estiagem. Herrmann e Alves (2014) apontam que os anos de maiores perdas financeiras em Santa Catarina foram os de 2007 e 2008. No entanto, apesar de não ter sido incluído nesta parte do presente estudo, Herrmann e Alves (2014) acrescentam que o trimestre fev/mar/abr de 2005 foi o período com a maior solicitação de decretos municipais devido a estiagem em Santa Catarina.

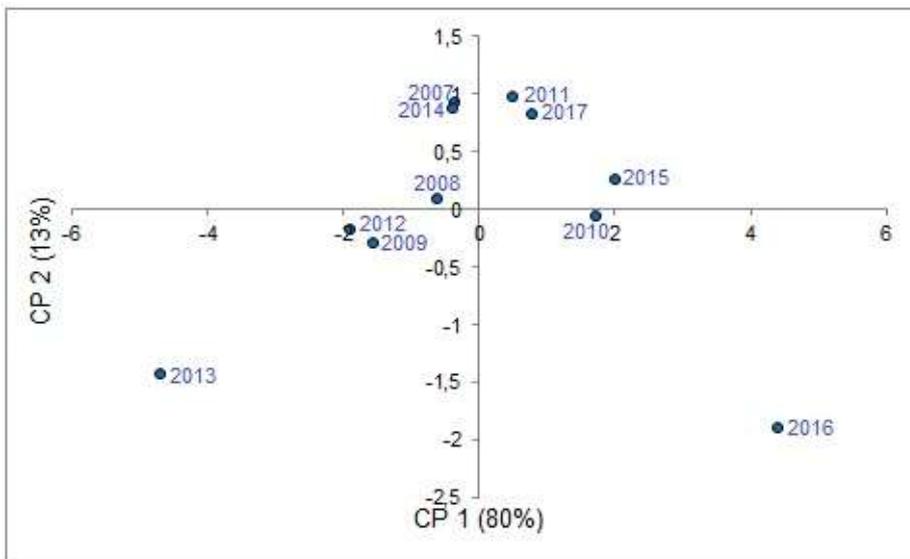


Figura 3 – Biplot de CP1 x CP2 com os indivíduos (índices e produtividade) dos anos/safras (2007 a 2017) em estudo para Campos Novos pela análise de componentes principais.

A Figura 4 apresenta somente os coeficientes de determinação (R^2) significativos entre cada um dos índices obtidos para diferentes datas de semeadura com a produtividade de milho. É notável que os índices obtidos a partir de semeaduras feitas na segunda quinzena de outubro possuem maior correlação com a produtividade. Assim, principalmente a *ETR/ETc*, *CWSI* e *DEF*, explicam entre 40% e 60% da variação da produtividade de milho semeado na segunda quinzena de outubro em Campos Novos. Parte destes resultados pode ser explicada pelo fato de outubro habitualmente ser o período de maior área plantada, ou seja, que irá ter maior reflexo na produtividade da safra. Envolvendo os impactos socioeconômicos resultantes de estiagens no oeste de Santa Catarina, Spinelli et al. (2020) afirmaram que estes eventos meteorológicos ocorreram de novembro a abril, sendo favorecidos pela influência de fenômenos e sistemas atmosféricos que, por vezes, atuaram em conjunto, como a Zona de Convergência do Atlântico Sul, a Oscilação Decadal do Pacífico, a La Niña e a Oscilação Antártica.

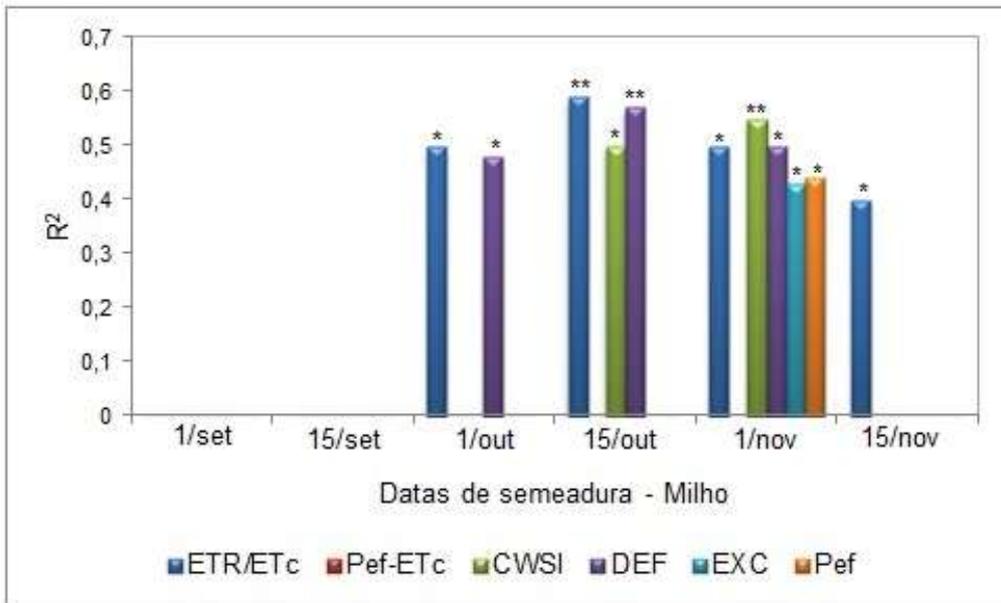


Figura 4 – Coeficientes de determinação (R^2) nas regressões significativas a 5% (*) ou 1% (**) entre os seis índices com a produtividade de milho semeado entre 1 de setembro (1/set) a 15 de novembro (15/nov) para Campos Novos.

Diante dos resultados supracitados, é compreensível que as correlações significativas com a produtividade tenham sido com *CWSI*, *ETR/ETc* e *DEF* (Tabela 5). Bergamaschi et al. (2006) encontraram que a maior redução na produção de milho ocorre em consequência do déficit hídrico na polinização, formação do zigoto e desenvolvimento inicial do grão, numa relação quadrática. Nesse período, a razão *ETR/ETc* explicou quase 80% das variações na produção de grãos, que se estabiliza acima de uma razão de 0,70. Costa et al. (2008) acrescentam que a cultura do milho é afetada de diferentes formas pelo DEF, com alterações no crescimento das plantas e expansão da área foliar durante os estádios vegetativos e da produção de matéria seca da parte aérea.

Como desconsiderou-se a tendência tecnológica na produtividade, o efeito de tecnologias foi incluída novamente nas equações visando o seu uso para fins de estimativa. Assim, a estimativa sendo adaptada da Equação 1, ficará da seguinte maneira: $Y_i = Y + (Y_{ix} - Y_o)$, onde Y_i é a produtividade do ano i estimada, incluída a tendência tecnológica, Y é a produtividade estimada com uso de um índice sem a tendência tecnológica, Y_{ix} é a produtividade estimada pela RLS da série de 2007 a 2017 ($453,2 \cdot \text{ANO} - 9,038E05$) e Y_o é a produtividade do primeiro ano da série histórica estimada pela referida equação de regressão (4413 kg/ha). Por exemplo, quando for realizada a estimativa de produtividade de milho em Campos Novos para a safra 2021, este valor (ANO) deverá ser incluído na equação. Dentre os três índices, o *CWSI* e a *ETR/ETc* podem ser aplicados no decorrer do ciclo da cultura de milho para estimar a sua produtividade obtida até então, enquanto a *DEF* somente poderá ser utilizada ao final do ciclo.

Tabela 5 - Coeficientes (R^2 e r) e equações de regressão significativas a 5% ou 1% pelo valor- p entre os índices e a produtividade de milho para Campos Novos.

Índices	R^2	r	valor- p	Equação de regressão $Y_i = Y + (Y_{ix} - Y_o)$
CWSI (X_1)	0,36	0,6	0,0501	$Y_i = (-8590 X_1 + 7186) + [(453,2 \text{ Ano} - 9,038E05) - 4413]$
ETR/ETc (X_2)	0,47	0,69	0,0192	$Y_i = (1,102E04 X_2 - 4214) + [(453,2 \text{ Ano} - 9,038E05) - 4413]$
Pef-ETc (X_3)	0,15	0,39	0,2325	
DEF (X_4)	0,45	0,67	0,0237	$Y_i = (-27,53 X_4 + 6736) + [(453,2 \text{ Ano} - 9,038E05) - 4413]$
EXC (X_5)	0,15	0,39	0,2337	
Pef (X_6)	0,25	0,5	0,1178	

Com a obtenção das equações para estimativa, usou-se a produtividade de milho de seis safras (2004, 2005, 2006, 2018, 2019 e 2020) para validá-las (Tabela 6). O desempenho na estimativa de produtividade usando o *CWSI*, *ETR/ETc* e *DEF* foram 'ótimos'. Esses índices explicaram entre 89% a 95% da variação de produtividade de milho. Em média, a diferença entre as produtividades observadas e as previstas variaram de 185,3 kg/ha a 433,1 kg/ha e não foram estatisticamente significativas, isto é, neste caso é o ideal que não tenham diferido. A tendência das estimativas pelos três índices ficou igualmente dividida nos seis anos avaliados, ou seja, houve três superestimativas e três produtividades subestimadas. No entanto, usando o *CWSI* e a *ETR/ETc*, a diferença dos valores superestimados foram maiores do que os valores subestimados em relação a produtividade observada, resultando no *EM* positivo (tendência de superestimar). Apesar do maior erro médio (*EM*), as estimativas de produtividade usando o *CWSI* teve o menor desvio entre as diferenças dos dois tipos de produtividade.

Tabela 6 - Avaliação da produtividade estimada de milho para Campos Novos usando o *CWSI*, *ETR/ETc* e *DEF*.

Estatística	Y - <i>CWSI</i>	Y - <i>ETR/ETc</i>	Y - <i>DEF</i>
r	0,98**	0,96**	0,94**
R²	0,95	0,92	0,89
d	0,98	0,98	0,99
EPE	966,1	1142,6	1482,2
EM	433,1 ^{ns}	185,3 ^{ns}	-372,8 ^{ns}
c	0,96	0,94	0,93
Desempenho	Ótimo	Ótimo	Ótimo

**Significativo a 1% pelo valor- p ; e ^{ns} não significativo ao nível de 5% ou 1% pelo teste *t Student*.

Com o uso do índice de seca *SPEI* (*Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*) Peña-Galardo et al. (2019) encontraram uma forte resposta na variabilidade da produtividade de milho, nos Estados Unidos, com secas de média e longa duração, exceto em regiões de clima úmido. Por isso, chamam a atenção que a resposta na produtividade em função da seca possui uma grande variação na escala espacial. Isto pressupõe que o desempenho na estimativa da produtividade de milho encontrado para Campos Novos, poderá ser diferente se aplicado em outras regiões de Santa Catarina.

No estudo da recente estiagem de 2019/20 observada no sul do Brasil, onde recorreu-se aos índices obtidos para seis estações em Santa Catarina, a

primeira componente foi o suficiente para explicar 77,3% da variação total do conjunto de índices (Tabela 7).

Tabela 7 - Componentes principais (CP), autovalores e porcentagem da variância explicada e proporção acumulada (%) pelos componentes.

Componente principal (CP)	Variância (Autovalores)	% da variância de CP	% acumulada da variância de CP
CP1	4,6369	77,28	77,28
CP2	0,9028	15,05	92,33
CP3	0,4392	7,32	99,65
CP4	0,0183	0,31	99,96
CP5	0,0026	0,04	100

Por isso, analisando os coeficientes da CP1 apresentados na Tabela 8, destacaram-se a *Pef*, o *EXC* e a *ETR/ETc*, sendo evidente o contraste destes, com o *CWSI* e a *DEF*. A *Pef-ETc* que eventualmente é utilizada como indicador do requerimento de irrigação, novamente foi um índice que não se destacou, descartando o seu uso para análises de produtividade e, ou, de estiagem.

Tabela 8 - Coeficientes de ponderação e de correlação das variáveis padronizadas com os dois primeiros componentes principais (CP).

Variável	Coeficientes de ponderação		Coeficientes de correlação	
	CP1	CP2	CP1	CP2
CWSI (X₁)	-0.4575	-0.14798	-0.98515	-0.1406
ETR/ETc (X₂)	0.40624	0.4303	0.87478	0.40886
Pef-ETc (X₃)	-0.24501	0.83923	-0.52759	0.7974
DEF (X₄)	-0.44843	-0.13264	-0.96562	-0.12603
EXC (X₅)	0.40523	-0.26536	0.87261	-0.25213
Pef (X₆)	0.44759	0.02494	0.96381	0.023697

Como a primeira CP explica 77,3%, pode-se concluir pela Figura 5 que os municípios de Campos Novos e Tangará tiveram os maiores valores de *Pef*, de *EXC* e da *ETR/ETc* (condição de menos seca). Na contrapartida, as localidades de Canoinhas e São Bento do Sul tiveram os menores valores de *Pef* e *EXC*, isto é, em termos de variabilidade climática (desconsiderando as tecnologias adotadas no cultivo de milho), as condições foram piores para a produtividade nos municípios do planalto norte, de Santa Catarina. Nota-se que a variabilidade climática foi distinta entre os municípios do meio oeste (Campos Novos, Tangará, Curitibaanos e Água Doce) que poderá resultar em produtividades bem distintas de milho na recente safra de verão em função da estiagem. Para a microrregião de Concórdia (onde localizam-se os municípios de Água Doce e Tangará), Minuzzi (2015) encontrou correlação entre a produtividade de milho com a distribuição de chuva de fevereiro.

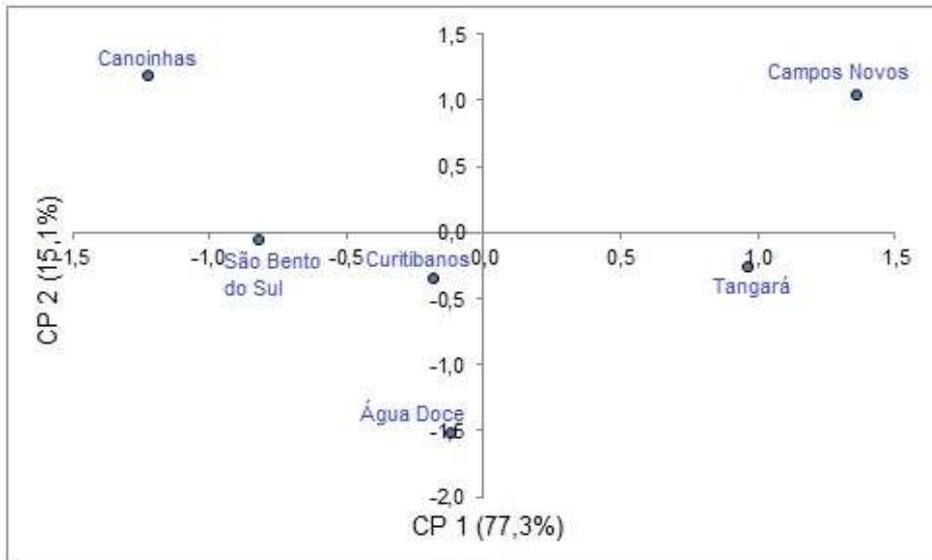


Figura 5 – Biplot de CP1 x CP2 com os indivíduos (municípios) em estudo para o ano agrícola 2019/20 pela análise de componentes principais.

Ressalta-se que as produtividades de milho para a safra 2019/20, apesar de indicarem redução devido à estiagem, numericamente ainda são prévias e para eventuais associações destes resultados (condições meteorológicas) da presente safra com as respectivas produtividades por município, deve-se considerar que neste estudo as simulações consideraram semeaduras de milho até 15 de novembro e, conseqüentemente, as colheitas se deram em meados de março, isto é, a estiagem persistiu após este período. Apesar disso, Wagner et al. (2013) mostraram que semeaduras de milho entre 31 de outubro e 10 de novembro, ocasionaram as menores probabilidades de ocorrência de déficit hídrico. Acrescentam que a probabilidade média de redução de produção por déficit hídrico é de aproximadamente 50%.

CONCLUSÕES

A *ETR/ETc*, *EXC*, *Pef*, *CWSI* e *DEF* podem ser usados na identificação de períodos de estiagens ou mais chuvosos. Porém, os dois últimos índices estão mais associados com a redução na produtividade de milho decorrente de estiagem, principalmente em semeaduras feitas na segunda quinzena de outubro na região de Campos Novos. O uso do *CWSI*, *ETR/ETc* e *DEF* para estimar a produtividade de milho apresentaram um 'ótimo' desempenho, podendo ser utilizadas como variáveis predictoras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Epagri/Ciram pelo fornecimento dos dados meteorológicos utilizados e ao CNPq pela concessão de bolsa de iniciação científica para o terceiro autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBAS, S., NICHOL, J.E., QAMER, F.M., XU, J. Characterisation of drought development through remote sensing: a case study in Central Yunnan, China. *Remote Sensing*. v.6, n.6, 4998–5018, 2014.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration. Rome: FAO, 1998. 297 p. (*Irrigation and Drainage Paper*, 56).
- AMS. *Drought: an information statement of the American Meteorological Society*. 2013. Disponível em: <<https://www.ametsoc.org/>>. Acesso em: 09 ago. 2020.
- 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*, v.41, n.2, p.243-249, 2006.
- BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. *O milho e o clima*. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, p.84, 2014.
- BHUIYAN, C., SINGH, R.P., KOGAN, F.N. Monitoring drought dynamics in the Aravalli region (India) using different indices based on ground and remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 8, p. 289–302, 2016.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 5, p. 89-97, 1997.
- COSTA, J. R. da; PINHO, J. L. N. de; PARRY, M. Produção de matéria seca de cultivares de milho sob diferentes níveis de estresse hídrico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, p. 443-450, 2008.
- DALLACORT, R.; FREITAS, P. S. L.; FARIA, R. T.; GONÇALVES, A. C. A.; REZENDE, R.; BERTONHA, A. Utilização do modelo Cropgrosoybean na determinação de melhores épocas de semeadura da cultura da soja, na região de Palotina, Paraná. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 28, p. 583-589, 2006.
- DOORENBOS, J.; KASSAN, A.H. Efeito da água no rendimento das culturas. 2.ed. Estudos FAO: *Irrigação e drenagem* n.33, 2000. 221p. (Traduzido por Gheyi, H.R. et al. - UFPB).
- DOUBRAWA, A. *A crise de água e sua possível relação com os parques remanescentes florestais na região oeste do estado de Santa Catarina*. 2007. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Regional de Blumenau – FURB, Centro de Ciências Biológicas, Blumenau.
- FERNANDES, D.S.; HEINEMANN, A.B.; PAZ, R.L.F.; AMORIM, A.O.; CARDOSO, A.S. Índices para a quantificação da seca. Santo Antônio de Goiás: *Embrapa Arroz e Feijão*, 2009. 45p. (Documentos, 244).
- HERRMANN, M. L. de. P. (Org.). *Atlas de desastres naturais do estado de Santa Catarina: período de 1980 a 2010*. 2 ° edição atualizada e revisada. Florianópolis, SC: Instituto Histórico e Geográfico de Santa Catarina, Cadernos Geográfico, 2014.

HERRMANN, M. L. de. P.; ALVES, D. B. As principais consequências negativas provocadas pelas adversidades atmosféricas no estado de Santa Catarina. In: HERRMANN, M. L. de. P. (Org.). Atlas de desastres naturais do estado de Santa Catarina: período de 1980 a 2010. 2 ° edição atualizada e revisada. Florianópolis, SC: Instituto Histórico e Geográfico de Santa Catarina, *Cadernos Geográfico*, 2014.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA)*. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>>. Acesso em: 13 ago. 2020

LINHEIRA, G. *Avaliação da ocorrência de seca na bacia hidrográfica do rio do peixe entre 2001 e 2010 utilizando o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)*. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Humanas e da Educação, Programa de Pós-Graduação em Planejamento Territorial e Desenvolvimento Socioambiental, Florianópolis, 2016, 96p.

MINUZZI, R. B. *Influência de algumas forçantes climáticas no período chuvoso da região sudeste do Brasil e suas consequências para as culturas da soja e do milho*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa - MG, 2006.

MINUZZI, R. B. Influência da distribuição de chuva na produtividade do milho no Meio Oeste de Santa Catarina. In: *Congresso Brasileiro de Agrometeorologia*, 19, Lavras, MG: SBAGRO, Anais..., p.1021-1025, 2015.

NASCIMENTO, A. A. S. *Uma análise sobre o déficit da produção de milho em Santa Catarina*. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação em Ciências Econômicas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. 50p.

NIED, A. H.; Heldwein, A. B.; Estefanel, V.; Silva, J. C.; Alberto, C. M. Épocas de semeadura de milho com menor risco de ocorrência de deficiência hídrica no município de Santa Maria, RS, Brasil. *Ciência Rural*, v.35, p.995-1002, 2005.

PEÑA-GALLARDO, M.; VICENTE-SERRANO, S. M.; QUIRING, S.; SVOBODA, M.; HANNAFORD, J.; TOMAS-BURGUERA, M.; MARTÍN-HERNÁNDEZ, N.; DOMÍNGUEZ-CASTRO, F.; KENAWY, A. E. Response of crop yield to different time-scales of drought in the United States: Spatio-temporal patterns and climatic and environmental drivers. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 264, p. 40–55, 2019.

PETRY, M. T.; ZIMMERMANN, F. L.; CARLESSO, R.; MICHELON, C. J.; KHUNZ, J. H. Disponibilidade de água do solo ao milho cultivado sob sistemas de semeadura direta e preparo convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, p. 531-539, 2007.

RENCHER, A. C. *Methods of Multivariate Analysis*. A JOHN WILEY & SONS, INC. PUBLICATION. 2ed. 2002. 727p.

SPINELLI, K. *Estiagem e a vulnerabilidade social no Oeste de Santa Catarina no período de 1999 a 2012*. Tese (Doutorado em Geografia), Departamento de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 309p., 2018.

SPINELLI, K.; NASCIMENTO, R.; FUENTES, M. Análise climática dos episódios de estiagem que provocaram danos socioeconômicos no oeste catarinense entre 1999 a 2012. *Revista Brasileira de Climatologia*, v.26, p.345-367, 2020.

STEINEMANN, A. C.; HAYES, M. J.; CAVALCANTI, L. F. N. Drought Indicators and Triggers. In: Wilhite, D. A., *Drought and Water Crises Science, Technology, and Management Issues*. Taylor & Francis Group. Nova York, 2005.

TIAN, L.; YUAN, S.; QUIRING, S. M. Evaluation of six indices for monitoring agricultural drought in the southcentral United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 249, p. 107–119, 2018.

VENÂNCIO, D.S. *As influências da variabilidade climática no desempenho agrônomo do milho na mesorregião Oeste catarinense*. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geociências, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 115 p., 2014.

WAGNER, M.V.; JADOSKI, S.O.; MAGGI, M.F.Ç SAITO, L.R.; LIMA, A.S. Estimativa da produtividade do milho em função da disponibilidade hídrica em Guarapuava, PR, Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, n.2, p.170-179, 2013.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, J.J.; FEDDEMA, K. M. & KLINK, D. R. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, Ottawa, v.90, n.5, p.8995-9005, 1985