

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



RODRIGO ROGERIO DA SILVA

IDENTIFICAÇÃO DE PREDITORES PARA ESTIMATIVA DE
PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR, NO LESTE DE PERNAMBUCO,
UTILIZANDO ANÁLISE DE CORRELAÇÃO CANÔNICA.

Recife - PE
2023

RODRIGO ROGERIO DA SILVA

**IDENTIFICAÇÃO DE PREDITORES PARA ESTIMATIVA DE
PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR, NO LESTE DE PERNAMBUCO,
UTILIZANDO ANÁLISE DE CORRELAÇÃO CANÔNICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientador:

Prof. Dr. Geber Barbosa de Albuquerque Moura

Recife - PE
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586i Silva, Rodrigo Rogerio da
IDENTIFICAÇÃO DE PREDITORES PARA ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR, NO
LESTE DE PERNAMBUCO, UTILIZANDO ANÁLISE DE CORRELAÇÃO CANÔNICA / Rodrigo Rogerio da Silva. -
2023.
68 f.

Orientador: Geber Barbosa de Albuquerque Moura.
Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola, Recife, 2023.

1. Temperatura da Superfície do Mar. 2. Ventos. 3. Pressão. I. Moura, Geber Barbosa de Albuquerque, orient. II.
Título

CDD 630

RODRIGO ROGERIO DA SILVA

**IDENTIFICAÇÃO DE PREDITORES PARA ESTIMATIVA DE
PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR, NO LESTE DE PERNAMBUCO,
UTILIZANDO ANÁLISE DE CORRELAÇÃO CANÔNICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Dissertação DEFENDIDA e APROVADA em 10 de fevereiro de 2023

BANCA EXAMINADORA

Orientador:_____

Prof. Dr. Geber Barbosa de Albuquerque Moura
Departamento de Agronomia/UFRPE

Examinadores:

Prof^ª. Dra. Cristina Rodrigues Nascimento
Departamento de Agronomia/UFRPE

Prof. Dr. Pedro Rogerio Giongo
Departamento de Engenharia Agrícola Campus sudoeste, unidade de Santa Helena/UEG

DEDICO

A Minha mãe/avó Amara M. da C. Silva, por todo esforço e dedicação na minha criação. A minha esposa, Aline Souto, pelo grande exemplo, por todo apoio e companheirismo. A minha filha Luíza, pelas alegrias proporcionadas.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela graça da vida.

À minha família, em especial à minha esposa Aline e filha Luíza, que sempre estiveram comigo.

À UFRPE e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade de cursar o mestrado.

Ao orientador Prof. Dr. Geber Barbosa de Albuquerque Moura, pela orientação e amizade durante todo o curso.

A Prof^a. Dra. Cristina Rodrigues Nascimento e Prof. Dr. Pedro Rogerio Giongo, pelas sugestões na apresentação do pré-projeto.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Agrícola, da UFRPE.

À Conab (Companhia Nacional de Abastecimento), pela autorização para realização do mestrado.

Aos meus amigos da Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Agnes, Antônio, Diego, Fabiano, Irene, Jéssica e Pedro, pela amizade e parceria durante as disciplinas.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação.

Muito obrigado!

Sumário

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	11
RESUMO	12
ABSTRACT.....	13
1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo Geral.....	15
2.2 Objetivos Específicos.....	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1 A cana-de-açúcar.....	17
3.1.1 Aspectos Taxonômicos e botânicos.	17
3.1.2 Aspectos Morfológicos	21
3.1.3 Aspectos Fisiológicos.....	23
3.1.3.1 Processo metabólico.....	23
3.1.3.2 Radiação.....	24
3.1.3.3 Fotoperíodo	24
3.1.3.4 Temperatura	24
3.1.3.5 Relações hídricas.....	25
3.1.3.6 Principais cultivares e seus respectivos usos.....	26
3.2 Variáveis climáticas e influencia na produtividade.....	28
3.2.1 Fenômeno El Niño – índice de Oscilação Sul (ENOS), Dipolo do Atlântico e suas influências sobre o Nordeste do Brasil.....	29
3.3 Análise de Correlação Canônica	33
4. MATERIAL E MÉTODOS	35
4.1 Área de estudo.....	35
4.2 Análise de Agrupamento.....	36
4.3 Dados de produtividade anual	37
4.4 Dados de Pressão da Atmosfera, Vento em 850 hPa e Temperatura da Superfície do Mar (TSM)	37
4.5 Correlações lineares	40
4.6 Análise de Correlação Canônica (ACC)	41
4.6.1 Variável Canônica e Correlação Canônica.....	41
4.6.2 Interpretação das Variáveis Estatísticas Canônicas.....	44
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	45

5.1	Análise de Agrupamento	45
5.2	Análises das correlações lineares para atraso de 3 meses.	48
5.3	Significância estatística e prática para o atraso de 3 meses.....	51
5.4	Análise de redundância para atraso de 3 meses.	52
5.5	Interpretação das variáveis estatísticas canônicas para atraso de 3 meses.	55
5.5.1	Pesos canônicos.....	55
5.5.2	Cargas canônicas	56
5.5.3	Cargas cruzadas canônicas	58
5.6	Validação e Diagnóstico para atraso de 3 meses.....	59
6.	CONCLUSÕES.....	60
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principais estruturas que se desenvolvem no rebolo da cana-de-açúcar, durante o perfilhamento.	17
Figura 2. Canavial em fase de brotação após o corte, local: Escada-PE.	18
Figura 3. Canavial entre as fases de perfilhamento e estabelecimento após a colheita, local: Escada-PE.	19
Figura 4. Canavial em florescimento, local: Escada-PE.	21
Figura 5. Canavial em florescimento, local: Ipojuca-PE.	21
Figura 6. Localização das 4 regiões do El Niño na Bacia do Pacífico adaptada.....	32
Figura 7. Localização da pressão atmosférica mensais à superfície das localidades Darwin e Tahiti.	33
Figura 8. Localização das regiões de temperatura da superfície do mar do Oceano Atlântico.....	34
Figura 9. Localização dos grupos homogêneos e microrregiões de Pernambuco, o símbolo vermelho representa o Grupo 1, o amarelo o Grupo 2 e de verde o Grupo 3.	39
Figura 10. Dendograma resultante da Análise de Agrupamento, utilizando-se o método de Ward e distância euclidiana para 58 municípios do setor leste de Pernambuco no período de dados de 1990 a 2019.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Relação dos municípios dos grupos homogêneos.	40
Tabela 2. Estatística descritiva dos grupos homogêneos.....	41
Tabela 3. Média, desvio padrão e correlações lineares de GPro1, GPro2, GPro3, MtsmAN, MtsmAS, Mdarwin, Mtahiti, Men12, MEN3, MEN4, MEN34, MedWE, MedWW, MedWC, atraso de 3 meses.	43
Tabela 4. Análise de correlação canônica, teste multivariado de significância.	44
Tabela 5. Cálculo dos índices de redundância para a primeira função canônica.	44
Tabela 6. Análise de redundância de variáveis estatísticas dependentes e independentes para as funções canônicas.	46
Tabela 7. Pesos canônicos para as três funções canônicas.	47
Tabela 8. Estrutura canônica para as três funções canônicas.	49
Tabela 9. Análise de sensibilidade dos resultados de correlação canônica consequentes da remoção de uma variável independente.	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AA	Análise de Agrupamento
ACC	Análise de Correlações Canônicas
ACP	Análises de Componente Principal
AN	Atlântico Norte
AS	Atlântico Sul
ATSM	Anomalias TSM
CPC	Climate Prediction Center
EN	El Niño
ENOS	El Niño/Oscilação Sul
GruPro	Grupo de Produtividade da Cana-de-Açúcar
hPa	Hectopascal
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IOS	Índice de oscilação sul
MCG	Modelo de circulação geral
Mdarwin meses	Média da pressão atmosférica à superfície em Darwin de três meses
MEA	Modo Equatorial no Atlântico
MedWC	Média de índices de ventos alísios mensais em 850 hPa do Pacífico Central (5° N-5°S, 175°W-140°W)
MedWE	Média de índices de ventos alísios mensais em 850 hPa do Pacífico Este (5°N-5°S, 135°W-150°W)
MedWW	Média de índices de ventos alísios mensais em 850 hPa do Pacífico Oeste (5°N-5°S, 135°E-180°W)
MEN12	Média do EN12 (0-10°S, 90°W-80°W) de três meses
MEN3	Média do EN3(5°N-5°S, 150°W-90°W) de três meses
MEN4	Média do EN4 (5°N-5°S, 160°E-150°W) de três meses (MEN3
Mtahiiti	Média da pressão atmosférica à superfície em Tahiti de três meses
MtsmAN	Média de TSM de três meses do Atlântico Norte
MtsmAS	Média de TSM de três meses do Atlântico Sul
NEB	Nordeste Brasileiro
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
°C	Grau Celsius
ODP	Oscilação Decadal do Pacífico
OMA	Oscilação Multidecadal do Atlântico
PNM	Pressão ao nível do mar
R² Canônico	Raíz canônica, autovalor, correlações canônicas ao quadrado, fornece uma estimativa da quantidade de variância compartilhada entre as respectivas variáveis estatísticas canônicas otimamente ponderadas de variáveis dependentes e independentes.
RB	República do Brasil
RIDESA	Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético
TROP	Tropical
TSM	Temperatura da Superfície do Mar

RESUMO

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de açúcar, sendo responsável por aproximadamente 39% das exportações mundiais na safra 2019/20 (FAO, 2020). Fatores climáticos exercem grande influência sobre a produção do canavial, sobretudo a precipitação que impacta diretamente e significativamente sobre os valores do rendimento agrícola. A estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar por meio de dados climáticos com antecedência auxilia no planejamento agrícola e subsidia decisões em campo e subsidia políticas públicas. Diante da necessidade da diversificação de métodos para predições, o objetivo dessa Dissertação foi encontrar as melhores variáveis preditoras através de análise de correlação canônica nos ventos alísios, TSM (Temperatura da Superfície do Mar), Pressão atmosférica à superfície no Oceano Pacífico Equatorial e TSM no Atlântico Tropical (área do Dipolo), para elaboração de modelos de previsão de produtividade da cana-de-açúcar, com antecedência de até três meses. A área de estudo compreendeu 58 municípios de Pernambuco, localizados na região leste do estado, em uma faixa ao longo do litoral, região da mata pernambucana, e, zonas de transição entre a mata e o agreste. A análise hierárquica de agrupamento, representada pelo dendrograma, produziu três grupos homogêneos de produtividade da cana-de-açúcar. Supõe-se, que a primeira função canônica se aproxima dos resultados de regressão múltipla e a variável estatística independente representa o conjunto de variáveis que melhor prevê as três medidas dependentes, principalmente a do conjunto de variáveis dependentes do segundo grupo de produtividade (GruPro2). Foi possível notar, que os melhores preditores são TSM no Atlântico Sul e Atlântico Norte, pressão atmosférica em Tahiti, os campos de ventos no Pacífico central e os campos de TSM nas áreas do El Niño 3.

Palavras-chaves: Temperatura da Superfície do Mar; Ventos; Pressão.

ABSTRACT

Brazil is the world's largest producer and exporter of sugar, accounting for approximately 39% of world exports in the 2019/20 harvest (FAO, 2020). Climatic factors have a great influence on sugarcane production, especially precipitation, which directly and significantly impacts agricultural yield values. The estimation of agricultural productivity of sugarcane through climate data in advance helps in agricultural planning and subsidizes decisions in the field and subsidizes public policies. Faced with the need to diversify methods for predictions, the objective of this dissertation was to find the best predictive variables through canonical correlation analysis in the trade winds, SST (Sea Surface Temperature), surface atmospheric pressure in the Equatorial Pacific Ocean and SST in the Tropical Atlantic (Dipole area), for the elaboration of sugarcane productivity forecast models, up to three months in advance. The study area comprised 58 municipalities in Pernambuco, located in the eastern region of the state, in a strip along the coast, in the Pernambuco forest region, and in transition zones between the forest and the wild. The hierarchical cluster analysis, represented by the dendrogram, produced three homogeneous groups of sugarcane productivity. It is assumed that the first canonical function approximates the results of multiple regression and the independent statistical variable represents the set of variables that best predicts the three dependent measures, mainly the set of dependent variables of the second productivity group (GruPro2). It was possible to notice that the best predictors are SST in the South Atlantic and North Atlantic, atmospheric pressure in Tahiti, the wind fields in the central Pacific and the SST fields in the El Niño 3 areas.

Keywords: Sea Surface Temperature; Wind; Pressure.

1. INTRODUÇÃO

Analisar as influências futuras de diversas variáveis meteorológicas na produção e rendimento da cultura tem sido o objetivo de muitos estudos ao longo do tempo, e vários modelos de estimativas foram e têm sido desenvolvidos e utilizados (MOURA, 2018). A maior parte dos modelos de estimativas de produtividade são elaborados, utilizando técnicas, sobretudo de regressão linear múltipla, dados orbitais e meteorológicos, estas previsões proporcionam aos tomadores de decisão, antecipar e planejar, ações direcionadas e econômicas nas áreas de produção.

As correlações canônicas referem-se às correlações entre variáveis canônicas, ou seja, entre combinações lineares de variáveis, de tal modo que a correlação entre essas combinações seja máxima. Assim, não existirá nenhuma outra combinação linear de variáveis cuja correlação seja maior que essa. (TRUGILHO et al., 2003).

A ACC tem sido utilizada em vários estudos de modelagem estatística, possuindo grande vantagem pelo fato de possibilitar a busca de padrões de oscilação conjunta entre dois ou mais campos físicos. Assim, encontra-se um conjunto de equações prognósticas e se constrói um modelo preditor (BARNETT & PREISENDORFER, 1987).

Nobre et al. (2018), com o objetivo de identificarem as associações que permitissem acréscimos no rendimento do girassol, realizaram um estudo de correlações canônicas envolvendo caracteres produtivos e vegetativos, utilizados para fins de melhoramento genético. Cunha et al. (2011), por meio de ACC, investigaram a relação entre as características morfológicas e produtivas de clones de capim-elefante (*Pennisetum* sp.), com o estudo foi possível sugerir quais características morfológicas apresentariam maior teor de matéria seca produzida pelos clones.

Estudo similar foi produzido por Rossi et al. (2014), onde com o uso de ACC, os autores avaliaram a correlação canônica existente entre os grupos de características agronômicas e características de biomassa em diferentes genótipos de capim-elefante visando identificar possíveis associações entre os grupos de variáveis a fim de utilizar essas informações em programas de melhoramento para fins energéticos. Definir quais variáveis tem maior poder de influência sobre os modelos, não é simples, devendo o pesquisador observar os princípios estatísticos aplicados a cada metodologia.

A ACC também é usada eficazmente para descrição de dados, verificação de modelos numéricos e construção de modelos estatísticos de previsão, proporcionando o

conhecimento de quais configurações tendem a ocorrer simultaneamente entre dois ou mais campos distintos e qual o grau de conexão entre eles (L'HEUREUX et al., 2015; RANA et al., 2018).

O presente estudo relaciona por meio da análise de correlação canônica os dados obtidos de bases climáticas com os grupos de produção da cana-de-açúcar obtidos por análise de agrupamento. A análise de correlação canônica pode verificar a existência e a intensidade das variáveis preditoras entre grupos de variáveis dependentes, indicando as variáveis climáticas mais importantes no rendimento agrícola nos grupos estudados.

Cabe ressaltar que, não há até o momento literatura sobre a utilização da ACC correlacionando dados meteorológicos com antecedência de até três meses, com o prognóstico do rendimento agrícola da cultura da cana-de-açúcar. O que torna a comparação com publicações similares difícil, no entanto torna uma excelente oportunidade para identificar preditores que possam ser utilizados em modelagens preditivas em nível macro para a região produtiva analisada.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Identificar as melhores variáveis preditoras através da utilização de análise da correlação canônica aplicada a dados obtidos de bases climáticas com grupos de produção da cana-de-açúcar caracterizados por análise de agrupamento para subsidiar a elaboração de modelos de previsão de produtividade da cana-de-açúcar com antecedência de até três meses.

2.2 Objetivos Específicos

- Aplicar análise de agrupamento em municípios localizados na região leste do estado de Pernambuco, em uma faixa ao longo do litoral, região da mata pernambucana e zonas de transição entre a mata e o agreste para identificar grupos homogêneos com base na relação de produtividade e variáveis preditoras;
- Auxiliar no desenvolvimento de modelos preditores de produtividade por meio de dados meteorológicos;

- Identificar as variáveis preditoras com maior carga canônica e relacionar a aplicação com modelos de regressão linear;
- Correlacionar a produtividade dos grupos com as anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM), ventos alísios e pressão da atmosfera à superfície no Pacífico Equatorial e TSM na região do Atlântico Tropical.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (espécie *Saccharum spp*) é uma planta monocotiledônea, pertencente à família *Poaceae*, alógama e perene (semi-perene do ponto de vista agrícola, devido à necessidade de renovação do canavial), com metabolismo C₄, portanto de rápido crescimento e que é cultivada em grande parte do mundo, especificamente em regiões tropicais e subtropicais. As espécies de cana-de-açúcar têm como centro de origem o continente asiático, provavelmente da Indonésia e Nova Guiné. No Brasil, a cana-de-açúcar chegou logo após o descobrimento do País, para quebrar o monopólio francês no suprimento mundial de açúcar, oriundo das colônias caribenhas (CANABRAVA, 2005).

O Brasil durante décadas foi o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e derivados, perdendo essa posição no período de 2017 a 2019 para a Índia (FAO, 2019). De acordo com a FAO (2020) o Brasil retomou a posição de maior produtor e exportador mundial de açúcar, logo em seguida, conseguindo ser o responsável por aproximadamente 39% das exportações mundiais na safra 2019/20. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2022) a área de cana-de-açúcar cultivada no Brasil é de 8,307 milhões de hectares, atingindo na safra 2022/23 uma produção de 598.345,4 mil de toneladas, com uma produtividade média de 72,026t/ha, com esses números de produção, o total de Etanol proveniente da cana-de-açúcar foi de 26,6 bilhões de litros. Já a produção de açúcar foi de 36,4 milhões de toneladas (CONAB, 2022). Já para o Nordeste a área cultivada soma 921,9 mil hectares, com produção de 3.251,5 mil toneladas de açúcar e 2,3 bilhões de litros de etanol (CONAB, 2022).

3.1.1 Aspectos Taxonômicos e botânicos.

A cana-de-açúcar é uma planta que se reproduz de forma sexuada, porém quando cultivada para fins comerciais, é multiplicada assexuadamente, por propagação vegetativa através de rebolos. Sendo cultivada em regiões tropicais e subtropicais, difundida em uma ampla faixa de latitude, compreendendo de 35°N a 30°S, adaptando-se assim a diversas condições de climas e solo, requerendo ainda precipitações

pluviométricas que variam de 1.500 e 2.500 mm por ciclo (RODRIGUES, 1995). Desenvolve-se por meio de touceiras, cuja parte aérea é formada por colmos, folhas, inflorescências e sementes, enquanto a parte subterrânea é composta por raízes e rizomas (MOZAMBANI et al., 2006). É cultivada em mais de 100 países em diferentes continentes (América, África, Ásia e Oceania). No que se refere à quantidade de países produtores, apenas 10 países concentram 80% da produção mundial. (FAO, 2019). Apresenta ciclo longo (10 a 12 meses) e um sistema radicular formado por raízes do tipo fasciculadas (Figura 1) e por rizomas, que são os responsáveis pela formação dos perfilhos na touceira (Segato et al., 2006).

Conforme descreve Singh et al. (2015) a cana apresenta a seguinte classificação taxonômica: Reino: Plantae, Ordem: Cyperales (Poales), Família: Poaceae, Subfamília: Panicoideae, Tribo: Andropogonae, Gênero: *Saccharum*, Espécie: *Saccharum spp.*

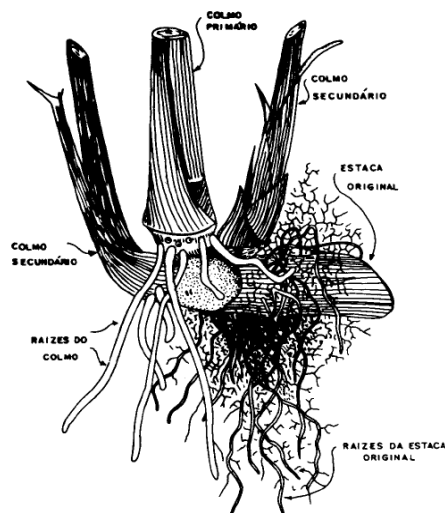


Figura 1: Principais estruturas que se desenvolvem no rebolo da cana-de-açúcar, durante o perfilhamento.

Fonte: MALAVOLTA e HAAG (1964)

A colheita da cana-de-açúcar normalmente ocorre antes da planta florescer, visto que o processo de floração causa uma redução do teor de açúcar. O florescimento se torna muito prejudicial quando ocorre simultaneamente à isoporização dos entrenós (SORDI; BRAGA JUNIOR, 1994). A isoporização ou “chochamento” se dá devido a desidratação dos tecidos do colmo que, perde água e adquirem, de forma gradativa, coloração branca, (CAPUTO et al., 2007). Frequentemente, as fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar são divididas em quatro estádios, sendo os mais comumente adotados:

1) Brotação e estabelecimento - Levando de 20 a 30 dias para o início da brotação, conforme Figura 2;



Figura 2: Canavial em fase de brotação após o corte, local: Escada-PE (coord.: -8,33833°, -35,23944°).
Fonte: O autor, 2020.

2) Perfilhamento – Que tem início em torno de 40 dias após o plantio e pode durar até 120 dias;

3) Máximo do crescimento - Dos 120 aos 270 dias após o plantio (ou corte);

4) Maturação - Quando ocorrem reduções nas taxas de crescimento e aumento no acúmulo de sacarose nos colmos, tendo início de 270 a 360 dias após o plantio (ou corte) e podendo se prolongar por até 6 meses (DIOLA; SANTOS, 2010).

O período de desenvolvimento de cada um desses estádios é diferente para a cana-soca em relação à cana-planta. O primeiro ciclo da cultura, chamado de cana-planta, pode ser de 12 meses (cana de ano) ou 18 meses (cana de ano e meio). Conceitua-se cana-planta como aquela cuja origem está em mudas plantadas e que, posteriormente, terão o primeiro corte. Após o primeiro corte, a cana brota e, nos ciclos sucessivos de corte/brotação, é denominada de cana-soca (GLERIANI, 2005). Após o primeiro corte, o ciclo passa a ser de 12 meses para todas as variedades, conhecida como cana-soca ou referenciada pelo número de cortes (cana de 2º, 3º, 4º, 5º corte,).



Figura 3: Canavial entre as fases de perfilhamento e estabelecimento após a colheita, local: Escada-PE (coord.: -8,254338°S, -35,265769°O).

Fonte: O autor, 2020.

O ciclo da cana-de-açúcar normalmente é de cinco anos, sendo que o plantio é realizado apenas no primeiro, e nos demais anos o rebrote é cultivado e colhido anualmente até que sua produtividade demonstre ser economicamente viável para renovação (BARBIERI, 2007). Conhecer o ciclo da cultura e os padrões de crescimento e desenvolvimento das plantas é importante para melhor manejá-la, pois já se sabe que toda produção vegetal que tenha em vista a máxima produtividade econômica, pauta-se na interação de três fatores: a planta, o ambiente de produção e o manejo. Com base nessa afirmação e conforme Câmara (1993), o processo canavieiro visa três objetivos básicos: (1) produtividade; (2) qualidade da matéria prima e (3) longevidade do canavial. A análise de crescimento das plantas é considerada um método padrão para se medir a produtividade biológica de uma cultura em seu ambiente de produção (MAGALHÃES, 1985). Para o crescimento da cana-de-açúcar há vários componentes fenológicos como o número de perfilhos, a altura e densidade dos colmos, que são de controle genético, mas que estão sujeitos a influências ambientais (SUGUITANI, 2006).

O ambiente de produção consiste no conjunto de características físicas, hídricas, morfológicas, químicas e mineralógicas da superfície e dos solos e nas condições climáticas (pluviometria, temperatura, radiação solar e evaporação) de um local (PRADO, 2011). Esse método tem sido utilizado para investigar efeitos de fenômenos ecológicos (adaptabilidade, diferenças genotípicas na capacidade produtiva, efeitos de competição e influência de práticas agronômicas) sobre o crescimento das plantas. Alguns dos aspectos de maior importância para se ter boa produtividade final das

plantas, estão relacionados com as práticas de plantio, levando em consideração fatores indispensáveis à otimização da cultura (JADOSKI et al., 2010).

3.1.2 Aspectos Morfológicos

As principais características das plantas pertencentes à família Poaceae são: inflorescências em forma de espiga, crescimento do caule em colmos, folhas com lâminas de sílica em suas bordas e bainhas abertas. A cana-de-açúcar na forma nativa é perene, de hábito ereto e levemente decumbente no estágio inicial de desenvolvimento. Já, nos estádios seguintes, a planta sofre seleção dos perfilhos por auto-sombreamento. Trata-se de uma planta de reprodução sexuada, porém, quando cultivada comercialmente, é multiplicada assexuadamente por propagação vegetativa. É caracterizada pela inflorescência do tipo panícula, flor hermafrodita, caule em crescimento cilíndrico composto de nós e entrenós, folhas alternas, opostas, presas aos nós dos colmos, com lâminas de sílica em suas bordas e bainha aberta (DANTAS NETO et al., 2010).

Singh et al. (2015) pontua que a cana cresce em aglomerados que consistem em vários caules bem desenvolvidos e não ramificados. O colmo da cana-de-açúcar é uma haste sem ramificações, com secção transversal aproximadamente circular, diferenciada em segmentos compostos por um nó e um entrenó. O nó consiste de uma gema lateral situada junto à inserção foliar, contendo primórdios foliares e um anel de crescimento, estes colmos variam em cor, sendo verdes, rosados ou roxos e podem atingir 5 m de altura. Os internódios contêm uma medula branca fibrosa, imersa em seiva açucarada. A distância entre os nós é regulada principalmente pelas condições meteorológicas experimentadas pela planta, ao longo do ciclo, sobretudo a disponibilidade de água no solo. As folhas alongadas, lineares e verdes têm nervuras centrais grossas e bordas dentadas que crescem até um comprimento de cerca de 30 a 60 cm e 5 cm de largura. A inflorescência ou panícula, da cana-de-açúcar, é também conhecida pelos nomes comuns de flecha, bandeira ou flor, com tamanho, cor e formas variáveis segundo as espécies ou variedades (Figuras 4 e 5).

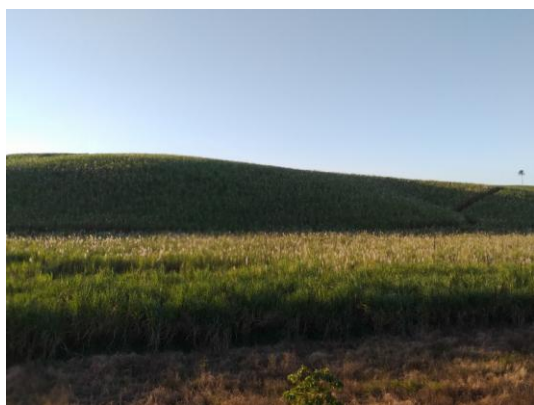


Figura 4: Canavial em florescimento, local: Escada-PE (coord.: -8,35722°S, -35,22506°O).



Figura 5: Canavial em florescimento, local: Ipojuca-PE (coord.: -8,35296°S, -35,17916°O).

Os frutos são secos e cada um contém uma única semente (Royal Botanic Gardens in Singh et al. 2015). A semente da cana-de-açúcar é uma cariopse, com cerca de 1,0 mm de diâmetro. O crescimento em altura continua até a ocorrência de alguma limitação no suprimento de água, de baixas temperaturas ou, ainda, devido ao florescimento, dependendo da resposta de cada genótipo às diferentes condições ambientais (DIOLA; SANTOS, 2010). Normalmente, o sistema de produção de cana-de-açúcar é constituído de uma safra oriunda do plantio do ano anterior, seguido de 5 ou mais safras oriundas da rebrota das soqueiras. O corte da cana-de-açúcar possibilita a renovação da cultura, não só da parte aérea, mas também do seu sistema radicular. Na soqueira, o sistema radicular apresenta-se mais superficial que na cana-planta, com cerca de 60% das raízes à profundidade de 30 cm. Em torno de 20 a 30 dias do corte, observa-se intensa brotação das soqueiras (SEGATO, 2006).

Para Jadoski et al. (2010), as plantas não respondem similarmente ao desenvolvimento radicial, a brotação, perfilhamento e crescimento da parte aérea; algumas são capazes de se desenvolver satisfatoriamente em condições edáficas em que outras não conseguiriam; sendo assim, a fisiologia do desenvolvimento do estágio vegetativo varia entre cultivares dentro de uma mesma espécie de acordo com o ciclo fenológico, havendo casos em que as diferenças entre cultivares são maiores que entre as espécies. Portanto a compreensão da fisiologia de cada estágio do ciclo fenológico se mostra necessária para o estabelecimento de bons estandes para a cultura e, consequentemente, a obtenção de boas produtividades.

Na plantação comercial, a propagação é assexuada, feita mediante o uso do colmo cortado em toletes de aproximadamente trinta centímetros. O desenvolvimento

do sistema radicular inicia-se logo depois do plantio. As gemas, localizadas na base do nódulo, são meristemas embrionários laterais e se mantêm inativas durante a dominância apical, devido à produção de auxinas. Nos primeiros 30 dias, quando ocorre a emissão de raízes de fixação e brotação de gemas, a cana-planta vive da reserva de nutrientes do tolete, e parcialmente dos nutrientes absorvidos pelas raízes de fixação. Após esse período, inicia-se o desenvolvimento das raízes dos perfilhos primários, depois dos perfilhos secundários, e assim sucessivamente, então as raízes de fixação perdem a função, e a cana-planta passa a depender exclusivamente da atividade das raízes dos perfilhos primários e secundários (CASAGRANDE, 1991).

Em condições favoráveis, estas gemas começam o seu desenvolvimento. Isso ocorre durante quase um mês depois da brotação. A planta jovem vive através da reserva presente no colmo no solo e com uso parcial de água e nutrientes supridos pelas primeiras raízes, cada gema podendo formar um colmo principal de uma touceira (MAGRO et al., 2011).

3.1.3 Aspectos Fisiológicos

3.1.3.1 Processo metabólico

A cana-de-açúcar *Saccharum spp.*, uma poácea do tipo C4, apresenta maior taxa fotossintética na captação de CO₂ da atmosfera. Adapta-se a grandes variedades de temperatura, intensidade luminosa e escassez de água, principalmente por necessitar de grande quantidade de água para o seu suprimento hídrico (SEGATO et al., 2006).

Em contraste com a maioria das outras espécies, que pertencem ao grupo das plantas C3. A denominação C3 ou C4 refere-se ao número de átomos de carbono presentes no primeiro produto da fixação do CO₂.

O mecanismo de concentração de CO₂ nas células do mesófilo nas plantas C4 mobiliza as moléculas de CO₂ e transportando-as na forma de uma molécula de quatro carbonos para descarboxilação nas células da bainha vascular (ALLEN et al., 1985 IN MARIN e NASSIF, 2013). Esse mecanismo permite às plantas C4, contudo, fechar parcialmente os estômatos reduzindo a condutância estomática e a transpiração quando submetidas a elevadas concentrações de CO₂. (MARIN e NASSIF, 2013).

Por esta via, as plantas C4 são capazes de ter altas concentrações de CO₂ nas células que rodeiam os vasos condutores, tendo uma oferta constante de CO₂, mesmo

com os estômatos fechados por questões ambientais. Por esse motivo, as plantas C4 também apresentam baixa fotorrespiração.

3.1.3.2 Radiação

A cana-de-açúcar como uma espécie com ciclo fotossintético do tipo C4, necessita de altas intensidades luminosas. Quando se tem elevadas taxas de radiação, os colmos ficam mais grossos e mais curtos e o perfilhamento intenso. Isso se dá devido a conversão de energia radiante em energia química quando submetida a condições de elevada temperatura do ar e radiação solar intensa, associadas à elevada disponibilidade de água no solo. A luz é o mais importante fator que influencia no perfilhamento, pois a iluminação adequada na base da planta durante esse período ativa gemas vegetativas basais (JADOSKI et al., 2010). Desta forma, com poucas condições de irradiação os colmos ficam mais finos e longos e as folhas, amarelas (RODRIGUES, 1995). A variação da densidade de perfilhos vai depender da intensidade luminosa diretamente sobre a planta, de modo geral a planta poderá perfilhar mais em condições maiores de luz (CHAVES JÚNIOR, 2011).

3.1.3.3 Fotoperíodo

Como mencionado no tópico de radiação, a cana tem necessidade de altas intensidades de iluminação, fazendo com que o fotoperíodo exerça papel fundamental na indução do florescimento da cana-de-açúcar. O fotoperíodo também influi fortemente sobre o desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar, explicando a variação no diâmetro e na elongação do colmo, que aumentam com fotoperíodos de 10 a 14 horas, mas reduzem-se quando o fotoperíodo ultrapassa 16 horas (RODRIGUES, 1995).

3.1.3.4 Temperatura

Com relação à temperatura esta exerce grande influência no crescimento dos colmos. Para valores abaixo de 20°C, o crescimento é praticamente nulo. Em termos de temperatura máxima, o crescimento seria lento, ocorrendo um estresse térmico sob condições de temperatura acima de 35°C e nulo acima de 38°C. A faixa ótima de

temperatura, para o crescimento dos colmos, está entre 25°C e 35°C, não se esquecendo de relacionar a temperatura com a radiação solar, principalmente, nos primeiros estádios de desenvolvimento da cultura. O prolongamento da fase juvenil, normal em condições de baixas temperaturas, ocorre em função da expansão relativa da razão de área foliar, em condições de períodos de recepção de alta radiação solar (MAGRO et al., 2011).

3.1.3.5 Relações hídricas

A disponibilidade de água é o fator mais crucial entre a variedade de cana, clima, condições de solo e disponibilidade de água (INMAN-BAMBER & SMITH 2005). A preocupação com o uso da água tem se tornado constante, dado que uso crescente de água e da demanda de alimentos pela população e também pelas industriais tem exigido técnicas agrícolas aprimoradas e eficientes com o uso da água. A quantidade de água a ser aplicada deve estar relacionada também ao requerimento hídrico e ao manejo da cultura. A cana-de-açúcar é uma cultura adaptada aos climas tropical e subtropical e produz relevante quantidade de biomassa (Tejera et al., 2007), sobremaneira quando adequadamente suprida por água, porém é uma cultura que demanda grande volume de água no seu sistema de produção (Wiedenfeld, 2004). O requerimento hídrico da cana-de-açúcar é influenciado pelos fatores de produção, normalmente reduzindo com a sucessão dos ciclos de cultivo (cana-planta, cana-soca e rессoca). Deste modo, a necessidade hídrica da cultura tende a apresentar grandes variações entre as regiões de produção (INMAN-BAMBER & SMITH, 2005. DANTAS NETO et al., 2010).

De acordo com Inman-Bamber (2004), a exposição prolongada à seca afeta negativamente o crescimento da parte aérea, especialmente a produção de folhas, acelerando a senescência foliar e da planta como um todo, e pode também levar a uma redução na interceptação da radiação, eficiência no uso da água e fotossíntese, bem como ao aumento da radiação transmitida para a superfície do solo. A água usada ou requerida pela cultura é governada em grande parte por trocas de energia na superfície cultivada e gradientes de energia interna no solo, planta e atmosfera contínua. A evaporação combinada da superfície do solo e transpiração através dos estômatos, ou seja, evapotranspiração, é muitas vezes (cerca de 100 vezes) maior do que a água retida pela cultura (INMAN-BAMBER, 2005).

Estudos relacionados ao consumo de água pela cultura e o uso de recursos hídricos para a irrigação vem-se tornando cada vez mais frequentes uma vez que tal operação é um dos fatores de maior influência na produtividade agrícola e no custo de produção da cana-de-açúcar (TEODORO et al., 2013). Assim, o manejo racional da água na cultura de cana-de-açúcar é fundamental para a maximização da produção (DANTAS NETO et al., 2006).

Segundo Gava et al. (2011), o crescimento e o desenvolvimento das plantas são afetados tanto pela falta quanto o excesso do suprimento de água.

A variabilidade na distribuição das chuvas pode resultar em diferentes respostas no desenvolvimento e produtividade das variedades de cana-de-açúcar em diferentes ciclos de cultivo (ALMEIDA et al., 2008; ABREU et al., 2013).

Da Silva et al. (2012), em experimento realizado na região semiárida do Submédio do Vale do São Francisco constataram que os valores de ET_c correspondentes à Fase I (brotação e estabelecimento da cultura) oscilaram em torno de $3,0 \text{ mm dia}^{-1}$; na Fase II (estabelecimento e perfilhamento), o valor médio da ET_c passou a $3,8 \text{ mm dia}^{-1}$, especialmente em decorrência do incremento da radiação interceptada pela cana-de-açúcar; na Fase III, período de máximo crescimento, os valores da evapotranspiração atingiram, em média, $5,1 \text{ mm dia}^{-1}$, destacando-se como o mais elevado do ciclo produtivo da cana-de-açúcar; entretanto, entre os 200 e 300 DAC, a ET_c apresentou diminuição acentuada em razão do tombamento da cultura, o que afetou o processo de evapotranspiração como resultado de uma redução do seu índice de área foliar. A evapotranspiração média da cana-de-açúcar foi de $4,7 \text{ mm dia}^{-1}$ e ao final do ciclo, 1710 mm.

3.1.3.6 Principais cultivares e seus respectivos usos.

As cultivares são híbridos interespecíficos tendo em sua constituição genéticas participam as espécies *S. officinarum*, *S. spontaneum*, *S. sinense*, *S. barberi*, *S. robustum* e *S. edule* (DANTAS NETO et al., 2010; JADOSKI et al., 2010).

Pela necessidade de obtenção de variedades adequadas aos interesses agrônomicos e industriais e, na busca pelo desenvolvimento de variedades próprias aos ambientes de produção, desenvolveu-se um forte programa de melhoramento genético, estudando as características das variedades, as melhores épocas para explorá-

las e o ambiente mais favorável para o plantio, em relação à água e ao solo, (ROSSETO & SANTIAGO, 2021).

Como toda atividade metabólica, o crescimento da brotação também é regulado pela programação genética específica de cada variedade. Sendo as condições ambientais (fenotípicas) ideais, o crescimento será ditado pelo genótipo vegetal. E cada variedade tem um crescimento diferente. Também existem diferenças varietais quanto à brotação em cana-planta e soqueira (MAGRO et al., 2011). Segundo planilha de levantamento de dados da safra de cana-de-açúcar da Conab (2021) disponibilizado por meio de sua Superintendência Regional em Pernambuco, que realiza anualmente o censo varietal, dentre as cultivares mais plantadas no estado de Pernambuco no ano de 2021, podemos citar conforme ciclos de desenvolvimento, as seguintes variedades:

- Variedades de Ciclo precoce: IAC-862210, IAC-873396, SP91-1049, SP83-5073, SP81-3250, SP80-1842, SP79-1011, SP77-5181, RB966928, RB925211, RB855453, RB855156, RB835486, RB835054, RB813804.
- Variedades de Ciclo médio: SP84-5257, SP82-3150, SP81-3804, SP80-1816, SP78-4768, SP78-4767, SP78-4764, SP70-1143, RB867015, RB855536, RB855113, RB845257, RB845210, RB763710, RB703710.
- Variedades de ciclo tardio: SP90-1638, SP83-2847, SP80-3280, SP74-4764, SP71-6949, RB935794, RB867515, RB863129, RB845197, RB835089, RB765710, RB75126, RB72458, RB72454, RB535089.

O presente estudo não identificou as cultivares da área de estudo, infere-se que quanto maior o número de informações e modelos produzidos especificamente para um grupo de cultivares torna a predição mais precisa.

O planejamento varietal, ou seja, a escolha das variedades é realizada após a determinação dos ambientes edafoclimáticos de produção e o ciclo de colheita (MARGARIDO, 2006). Nos ciclos de colheita, as canas são classificadas em precoce ou de início de safra, média e tardia ou de final de safra. As canas recomendadas para colheita entre os meses de março e junho são consideradas precoces, entre julho e setembro são consideradas médias e as colhidas entre outubro e dezembro são consideradas tardias (MARGARIDO, 2006).

Para Pernambuco esse calendário agrícola deve ser modificado visto nessa região o início da safra refere-se aos meses de agosto e setembro, intermediado por Outubro, novembro e dezembro, e o final de safra janeiro a fevereiro, podendo se estender até março. A adoção e uso de novas variedades é a melhor forma de quantificar

o resultado das pesquisas e do investimento de recursos públicos e privados. Montans Neto et al. (2008) apresentaram levantamento realizado em 99 unidades produtoras, totalizando uma área de 2.544.198 hectares, constatando que as variedades RB ocupavam 54% da área total de produção, seguidas pelas variedades SP, com 39%. Na ocasião, as variedades IAC representavam 2% e, as demais variedades (clones e, ou, variedades antigas), ocupavam 5% da área total de produção.

A RIDESA – Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético, cujas variedades desenvolvidas iniciam com a sigla RB – República do Brasil, tem forte contribuição para a produção canavieira no Brasil, respondendo em 2015 por 68% de área total cultivada (RIDESA, 2015).

3.2 Variáveis climáticas e influencia na produtividade.

O setor leste do Nordeste Brasileiro (NEB) devido a sua localização está submetido à influência de sistemas meteorológicos, os quais interagem entre si, conferem-lhe características próprias. A Zona de Convergência Intertropical atua no período de março a abril. A penetração de ar frio das massas de ar polar normalmente está associada à formação de frentes frias que influenciam na precipitação no período que vai de abril a agosto. As ondas de leste que são sistemas que se formam sobre o Oceano Atlântico atuam entre maio e julho. Os sistemas de brisas marítimas afetam o regime de chuvas no Litoral do NEB, com maior intensidade no período que vai de maio a junho. O NEB sofre influências significativas das circulações atmosféricas e oceânicas no Atlântico e Pacífico (MARKHAM e MCLAIN, 1977; ALVES et al., 1993; NOBRE, 1993; BRAHMANANDA RAO & DE LIMA, 1993; HOUNSOU-GBO et al., 2015).

Tem-se obtido êxito considerável nas previsões dos eventos do fenômeno El Niño/Oscilação Sul (ENOS), por meio de simulações (modelos) dos fenômenos físicos da interface oceano - atmosfera. Além disso, o conhecimento sobre o Atlântico tropical (Dipolo do Atlântico), conjuntamente com as informações sobre o ENOS, permite elaborar previsão sobre a precipitação pluvial que tem influencia direta no rendimento agrícola.

É necessário compreender como diferentes fatores climáticos interagem e influenciam a produção agrícola, assim tomar decisões pautadas tecnicamente garante maiores chances de sucesso nos cultivos agrícolas.

Agências e institutos meteorológicos mundiais publicam previsões sazonais e anuais das condições meteorológicas, incluindo diversas variáveis climáticas. Essas informações podem ser aplicadas para avaliação de impactos de alterações sazonais e interanuais de variáveis climáticas sobre o rendimento das culturas. (ARAGHI, MAGHREBI & OLESEN, 2022). Assim, combinar modelos de cultivo com previsões climáticas de curto e longo prazo é uma abordagem prática e confiável; portanto, os esforços de pesquisa nos últimos anos abordaram como os modelos de cultivo simularam as respostas do rendimento das culturas às variações climáticas (ASSENS et al. 2015).

3.2.1 Fenômeno El Niño – índice de Oscilação Sul (ENOS), Dipolo do Atlântico e suas influências sobre o Nordeste do Brasil

O índice de oscilação sul (IOS) é um fenômeno de grande escala que é caracterizado pela diferença de pressão padronizada em Darwin (Austrália) e Tahiti (Polinésia Francesa) e está associado ao enfraquecimento ou a intensificação dos ventos alísios sobre o Oceano Pacífico Equatorial, o IOS é considerado positivo quando a pressão está maior no Tahiti e negativo quando a pressão está maior em Darwin.

Rodríguez-Fonseca et al. (2009) encontraram evidências que desde o final da década de 60 os eventos de ENOS no Pacífico são precedidos por eventos de sinal oposto nas anomalias TSM (ATSM) do Atlântico Equatorial. O mecanismo proposto para essa relação é que um evento de anomalia positiva (negativa) no Atlântico Equatorial intensifica uma circulação de Walker anômala com movimentos ascendentes (descendentes) sobre o Atlântico Equatorial e descendente (ascendente) sobre o Pacífico equatorial leste (KAYANO et al. 2011; CAPOTONDI et al., 2015; ANDREOLI et al., 2017). Esse mecanismo induz processos oceânicos que favorecem o afloramento (afundamento) da termoclina, o que contribui para que a região do Pacífico equatorial leste se torne ainda mais fria (quente), intensificando-se a La Niña (o El Niño) existente.

Nóbrega et al. (2014) identificaram tendências de índices extremos de precipitação sobre a Paraíba, e fizeram correlação dos índices com as anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) dos Oceanos Atlântico e Pacífico. Os dados de precipitação diária, no período de 1935 a 2004, foram oriundos de 23 postos pluviométricos pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Utilizaram o programa RClimdex para calcular os índices extremos de precipitação, e

aplicaram o método dos mínimos quadrados e o teste não paramétrico de Mann-Kendall para identificar as tendências e suas respectivas significâncias estatísticas. Também calcularam as correlações entre os índices extremos de precipitação e a TSM e encontraram maior número de localidades com tendências positivas no período de 1935 e 1969, e as maiores correlações ocorreram com o Atlântico. As Mesorregiões do Sertão e Agreste do estado da Paraíba tiveram relação com as anomalias de TSM do Atlântico, Pacífico e Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA), a região do planalto da Borborema com as do Atlântico e OMA e, o Litoral com o Atlântico.

Kayano et al. (2011), analisaram a evolução temporal das ATSM relacionadas ao ENOS que ocorreram após eventos quentes/frios no Atlântico Equatorial e aqueles que ocorrem independentemente das condições do Atlântico Equatorial. Seus resultados mostraram diferentes padrões de evolução das anomalias de TSM e de pressão ao nível do mar (PNM), principalmente em relação às teleconexões associadas ao ENOS com efeitos na precipitação. Do acima exposto, os resultados anteriores sugerem a existência da relação interbacias. No entanto há discrepâncias sobre a questão da precedência. Alguns autores sugerem que o Pacífico Tropical tem uma significativa influência no Atlântico Tropical (ENFIELD e MAYER, 1997; LATIF e GROTZER, 2000; TASCHETTO et al., 2015), enquanto recentes estudos têm mostrado uma associação reversa, de modo que um evento quente (frio) no Atlântico Equatorial pode ser seguido de um evento frio (quente) no Pacífico Tropical (RODRIGUEZ-FONSECA et al. 2009). Silva et al. (2011) aplicaram Análises de Componente Principal (ACP) e Análises de Agrupamento (AA), aos dados de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) para os Oceanos Atlântico (Norte (NATL), Tropical (TROP) e Sul (SATL)) e Pacífico (Niño1+2, Niño 3.4, Niño 3 e Niño 4). Utilizaram de dados mensais de janeiro de 1950 a dezembro de 2010 de TSM obtidos na NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration/Earth System Research Laboratory). As regiões TROP e NIÑO4 apresentaram as maiores TSM para os meses entre dezembro a julho. A região NATL apresentou no período de agosto a outubro seus maiores valores de TSM. A região Niño 1+2 apresentou os menores valores de TSM. Os resultados da Análise em Componente Principal (ACP) identificaram maiores pesos na variação total explicada pelas duas primeiras componentes, que representam cerca de 100% da variância total dos dados de TSM. A Análise de Agrupamento (AA), pelo método Ward, permitiu o agrupamento das TSM em três grupos homogêneos.

O ENOS é o principal mecanismo de teleconexão interanual, e afeta o regime de precipitação da América do Sul, ele vem sendo estudado e compreendido por inúmeros autores no que se diz respeito a aspectos regionais. Grimm e Tedeschi (2009) descreve que a classificação da intensidade do ENOS é realizada considerando as alterações na TSM, na pressão e nos ventos alísios da região do Pacífico Equatorial. Esses comportamentos influenciam a circulação da célula de Walker, que promove teleconexões com diferentes respostas em diversas localidades do globo. No Brasil, segundo Grimm e Tedeschi (2009), durante a ocorrência de El Niño (La Niña), observa-se aumento (diminuição) de chuvas no Sul do Brasil, sendo que nas regiões Norte e Nordeste a resposta é oposta.

Em escala mais ampla, ou seja, decadal, a teleconexão Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) está vinculada à TSM do Oceano Pacífico, sendo composta por anomalias negativas (positivas) de temperaturas do Pacífico Tropical e positivas (negativas) no Pacífico Extratropical fase fria (fase quente) (MOLION, 2005). Durante a fase quente e fria, o autor como Molion (2005) constatou maior quantificação de casos de teleconexão interanual do tipo El Niño e La Niña, respectivamente.

Hastenrath et al. (1984), procurando um método de previsão para anos secos e chuvosos no NEB, concluíram que os melhores preditores para a precipitação são os parâmetros da circulação oceânica e atmosférica de grande escala, e que uma previsão através desses campos poderia ser feita com até seis meses de antecedência.

Nobre et al. (1985), encontraram alta correlação entre a precipitação do NEB e padrões de teleconexão da circulação atmosférica no Hemisfério Norte. Esses padrões, caso se estabeleça, precedem a estação chuvosa de 1 a 3 meses, de tal forma que podem ser usados como elemento precursor para se estimar a precipitação.

Aragão (1986) realizou uma série de experimentos com um modelo de circulação geral (MCG) do National Center for Atmospheric Research (NCAR), no qual anomalias de temperaturas da superfície do Oceano Pacífico foram utilizadas para simular respostas na atmosfera devidas a eventos El Niño. Uma análise paralela de composição de dados observacionais de precipitação foi realizada para mostrar a evidência empírica da relação entre eventos de El Niño e secas no NEB.

Servain e Seva (1987) analisaram as correlações entre intensidade das altas pressões de superfície dos Atlânticos Tropicais norte e sul, e conseqüentemente dos alísios sobre o Atlântico Tropical e a precipitação no NEB (semiárido ocidental), observando que nos anos de seca existe um aumento na intensidade do anticiclone do

Atlântico Tropical sul, e um enfraquecimento no Atlântico Tropical norte, resultando em alísios de sudeste mais fortes, e de nordeste mais fracos.

Araújo et al. (2013), estudaram os impactos de eventos anômalos no oceano Pacífico associados ao El Niño-Oscilação Sul (ENOS) na precipitação da região norte e nordeste da América do Sul no período de 1900 a 2007, fizeram uso de análise de composições. Segundo eles os eventos El Niño (La Niña) no Pacífico juntamente com um Modo Equatorial no Atlântico (MEA) frio (quente) formam um gradiente interbacias entre o Pacífico e Atlântico e que foram analisados, separadamente, aqueles para os quais o gradiente se forma na fase inicial do ENOS daqueles em que o gradiente se forma na fase de decaimento do ENOS. Os resultados mostraram que o padrão de precipitação na região norte e nordeste da América do Sul é reforçado mediante a configuração do gradiente interbacias durante a fase inicial do ENOS. Nesse caso, uma possível explicação é que o MEA de sinal contrário ao ENOS durante sua fase inicial cria condições favoráveis para o desenvolvimento de um gradiente inter-hemisférico no Atlântico Tropical atuando no mesmo sentido do gradiente interbacias, e colaborando para fortalecer o efeito do El Niño (La Niña) na precipitação. Por outro lado, para os eventos ENOS em que o gradiente se forma em sua fase de decaimento, o impacto na precipitação é mais significativo na região norte e centro-oeste da bacia. Uma possível explicação para essas diferenças está associada às mudanças que ocorrem na circulação atmosférica leste-oeste associada ao gradiente leste-oeste de anomalias da TSM.

Makham e McLain (1977) estudaram as correlações entre as anomalias de TSM sobre o Atlântico Tropical e a precipitação sobre o NEB e concluíram que anomalias positivas de TSM sobre o Atlântico Tropical sul e negativas no Atlântico Tropical norte gera maior precipitação sobre o NEB e a situação inversa gera anos de seca. Como a formação desse quadro de temperatura acontece alguns meses antes do início da estação chuvosa, concluíram que as anomalias de TSM poderiam ser usadas como um elemento precursor para estimar a qualidade da estação chuvosa no NEB.

Moura e Shukla (1981) propõem que um possível mecanismo para ocorrência de anos secos (falta de chuva) sobre o NEB seja o estabelecimento de uma circulação térmica direta local, que modifica a circulação normal de Hadley, a qual tem seu ramo ascendente em torno de 10N e seu ramo descendente sobre o NEB, Amazônia oriental e regiões oceânicas vizinhas. Esta circulação anômala seria resultante do aquecimento devido à anomalia de TSM quente sobre o norte do Atlântico Tropical, associada a um aumento de convecção úmida e produção de nebulosidade, e o resfriamento associado

com anomalia fria de TSM ao sul do Atlântico Tropical, com inibição de formação de nuvens. Os efeitos combinados da subsidência termicamente forçada e a redução da evaporação e da convergência do fluxo de umidade produzem severas condições de seca sobre o NEB. Quando as anomalias estão invertidas, isto é, TSMs mais quentes no sul e mais frias no norte, existe condição de chuvas intensas no NEB.

3.3 Análise de Correlação Canônica

No trabalho, usa-se a técnica de Análise de Correlações Canônicas (ACC), a qual permite encontrar combinações lineares, chamadas “variáveis canônicas”, a partir de dois conjuntos de dados (por exemplo, X2: preditor e X1: preditando), de forma que a correlação entre estas variáveis seja maximizada. A correlação canônica é uma técnica de análise de dados multivariada generalista, pois requer um menor número de restrições sobre os tipos de dados com os quais ela opera (PROTÁSIO, 2012).

De acordo com Hair Junior et al. (2005), a análise de correlação canônica consiste na obtenção de funções canônicas, sendo que cada função é composta por um par de variáveis estatísticas, representando as variáveis dependentes e independentes. O número máximo de funções canônicas que pode ser obtido é igual ao número de variáveis do menor conjunto de dados. Ainda para os autores, primeiro par de variáveis estatísticas canônicas é obtido de forma a ter-se a maior intercorrelação possível com os grupos de variáveis. Já para o segundo par em diante exibi-se a maior relação entre os grupos de variáveis analisadas, mas que não foi explicada pelo par anterior.

De acordo com Mazouz, Assani & Rodríguez (2013), A ACC é uma extensão multivariada da análise de correlação que tem como principal objetivo maximizar as correlações entre dois conjuntos de variáveis. Os dois conjuntos de variáveis são tratados simetricamente e, portanto, não há distinção fundamental entre as variáveis dependentes (produtividade) e independentes (índices climáticos).

A técnica de ACC tem sido aplicada em vários estudos de modelagem estatística, como por exemplo, para identificar sequências críticas de padrões preditores, que tendem a evoluir para padrões subsequentes e que podem ser usados para formar uma previsão, em um sistema estatístico para prever anomalias de temperatura da superfície do mar nos oceanos tropicais, com ênfase no Atlântico tropical (REPELLI & NOBRE, 2004). Estudo semelhante foi conduzido por Landman & Mason (2001), onde as variáveis canônicas foram usadas para fazer previsões mensais de anomalias da

temperatura da superfície do mar usando características evolutivas e de estado estacionário das temperaturas antecedentes da superfície do mar como preditores.

Abel, Rajagopalan & Ray (2020), desenvolveram modelos preditivos de previsão *multisite* usando ACC para contagens de lagoas no sudeste da *Prairie Pothole Region*, Estados Unidos, para auxiliar em tomada de decisões. Esses modelos de previsão prevêem a contagem de lagoas na primavera (maio) e no verão (julho) para cada região (estrato) das pesquisas de lagoas e aves aquáticas do Serviço de Pesca e Vida Selvagem dos Estados Unidos, usando um conjunto de variáveis e índices climáticos antecedentes de grande escala, incluindo pressão de 500 milibares, temperaturas da superfície do mar e índice de severidade de seca.

Um modelo estatístico linear, por meio da análise de correlação canônica foi impulsionado com auxílio de algoritmo de otimização simplex Nelder-Mead (chamado CCA-NMS) para prever os totais de precipitação sazonal padronizada da África Oriental em 3 meses usando campos de anomalia pressão do nível do mar e de temperatura da superfície do mar dos oceanos Índico e Atlântico (NTALE, GAN & MWALE, 2003).

A grande vantagem da ACC está no fato de a mesma possibilitar a busca de padrões de oscilação conjunta entre dois ou mais campos físicos. A partir daí, encontra-se um conjunto de equações prognósticas e se constrói um modelo preditor. Ao ter-se grande número de variáveis a serem interpretados, uma análise univariada pode apresentar limitações ou tornar-se muito complexa. As análises multivariadas possuem grande aplicação, nos casos em que diversos fatores influenciam o resultado, com diferentes ponderações (MINGOTI, 2005).

Correlações canônicas descrevem a relação entre variáveis independentes métricas e medidas dependentes múltiplas (HAIR et al., 1998). Esta técnica é frequentemente utilizada em estudos exploratórios onde, de um grande número de variáveis, o pesquisador pode estar interessado em examinar apenas algumas combinações lineares dentro do conjunto (TRUGILHO et al., 2003). Ainda segundo Trugilho et al. (2003), uma característica em destaque da análise de correlação canônica é que, contrária aos componentes principais, ela é invariante à escala das variáveis. As correlações canônicas referem-se às correlações entre pares canônicos, ou seja, entre combinações lineares de variáveis, de tal modo que a correlação entre essas combinações seja máxima. Dessa forma, não existirá nenhuma outra combinação linear entre variáveis, cuja correlação seja maior que essa (MINGOTI, 2005). O método

permite descrever as relações que existem entre dois grupos de variáveis, maximizando a correlação entre os vetores de variáveis que são consideradas de alguma forma dependentes e independentes (BARNETT e PREISENDORFER, 1987).

As Análises de Correlação Canônica tem sido utilizadas com frequência em estudos de melhoramento genético de espécies forrageiras e cereais: Nobre et al. (2018) estudaram a ACC aplicada ao melhoramento de Girassol, Cunha et al. (2011) e Rossi et al. (2014), identificaram por meio da ACC grupos de características agrônomicas e morfológicas em plantas de capim-elefante. Silva et al. (2023), por meio de ACC baseadas nas correlações genótípicas conseguiram selecionar de maneira direta e indireta genótipos superiores de trigo. Oliveira & Padovani (2017), aplicando a técnica multivariada com ACC mostrou associação significativa entre componentes agrícolas de nove diferentes culturas e quatro características climáticas (temperatura, evapotranspiração, precipitação e umidade relativa).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A área de estudo compreende 58 municípios de Pernambuco, localizados na região leste do estado, em uma faixa ao longo do litoral, região da mata pernambucana, e, zonas de transição entre a mata e o agreste: Aliança, Buenos Aires, Camutanga, Condado, Ferreiros, Goiana, Itambé, Itaquitinga, Macaparana, Nazaré da Mata, São Vicente Férrer, Timbaúba, Tracunhaém, Vicência, Belém de Maria, Bom Jardim, Canhotinho, Carpina, Chã Grande, Jaboatão dos Guararapes, João Alfredo, Lagoa do Carro, Lagoa de Itaenga, Lagoa dos Gatos, Limoeiro, Machados, Panelas, Paudalho, Quipapá, São Benedito do Sul, São José da Coroa Grande, Água Preta, Amaraji, Barra de Guabiraba, Barreiros, Bonito, Cabo de Santo Agostinho, Catende, Chã de Alegria, Cortês, Escada, Gameleira, Glória do Goitá, Igarassu, Ipojuca, Itapissuma, Joaquim Nabuco, Maraial, Moreno, Palmares, Pombos, Primavera, Ribeirão, Rio Formoso, São Lourenço da Mata, Sirinhaém, Vitória de Santo Antão e Xexéu.

A zona da mata de Pernambuco, formada pelas mesorregiões Metropolitana de Recife e pela Mata pernambucana, é onde está inserida as agroindústrias sucroalcooleiras, que compreende uma área com cultivo da cana-de-açúcar de 233,9 mil

hectares na safra 2022/23 (Conab, 2022). A região é composta de áreas onde anteriormente situava-se a mata atlântica, esta vegetação ocupa aproximadamente 12,3% de sua cobertura original em Pernambuco (S.O.S MATA ATLÂNTICA; INPE, 2022).

4.2 Análise de Agrupamento

Os grupos foram escolhidos a partir de análise de agrupamento utilizando o método hierárquico de Ward (Ward, 1963). A análise de agrupamento permite classificar o conjunto de unidades ou observações em grupos relativamente homogêneos.

Este método permite determinar, a partir das características das unidades, subconjuntos em que cada unidade pertença somente a um subconjunto, e que as unidades agrupadas em um mesmo subconjunto sejam similares entre si e diferentes das unidades de outros subconjuntos (Souza, 2000).

Para a análise de agrupamento dos municípios, considerou-se a distância utilizada como função de agrupamento para medir a similaridade ou dissimilaridade entre os indivíduos (postos), P_i e P_j como distância euclidiana, que são dadas pela Equação 1.

$$D(P_i, P_j) = \left[\sum_{q=1}^n N_i (P_{iq} - P_{jq})^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

em que, P_{ij} representa a produtividade dos cultivos, os municípios P_i e P_j , n representa o número de anos, e q representa os anos, N_i representa os indivíduos (localidades) organizados em K classes.

O critério de agrupamento utilizado foi o de Ward (1963) o qual propõe que, em qualquer estágio de uma análise, a perda de informação resultante de agrupamento pode ser medida pela soma dos quadrados dos desvios (SQD) de cada ponto com relação à média do grupo ao qual pertence. Logo para os N_i indivíduos (localidades) organizados em K classes, onde o X_i é o indivíduo pertencente a i -ésima classe (Equação 2).

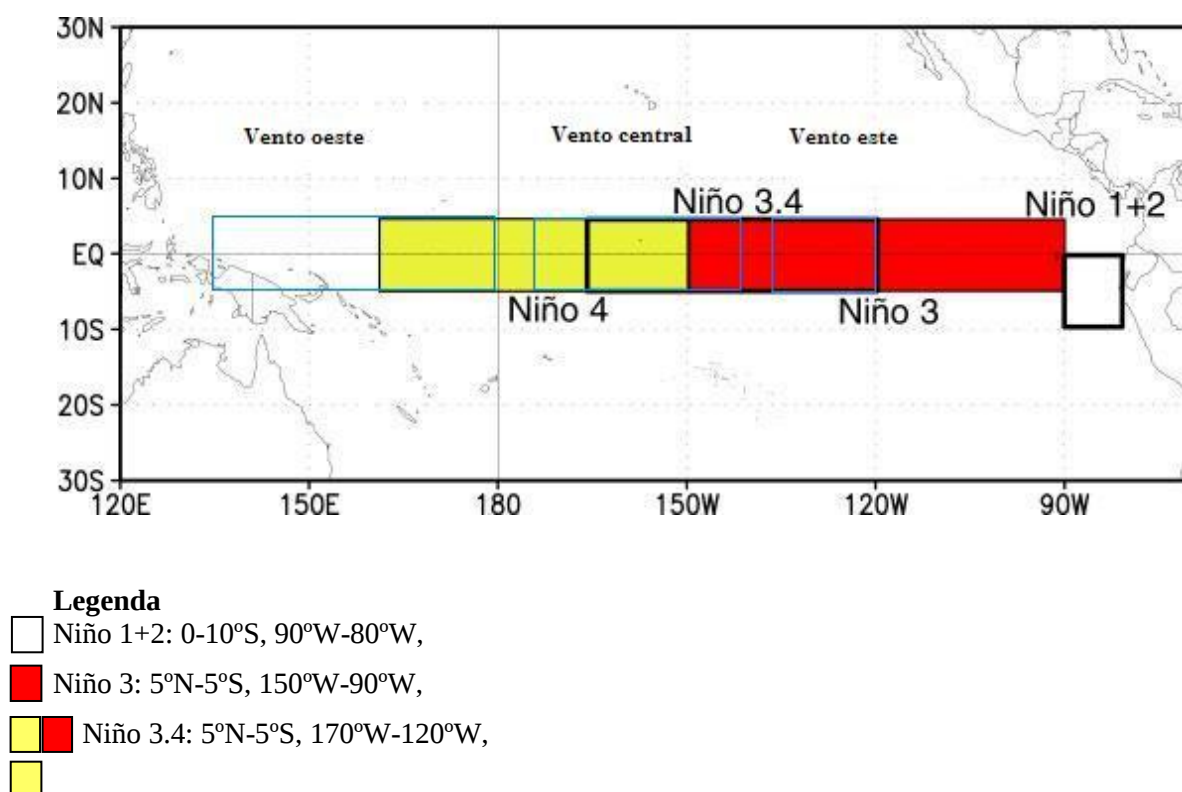
$$SQD = \sum_{i=1}^n \left[X_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum X_i \right)^2 \right] \quad (2)$$

4.3 Dados de produtividade anual

Os dados de produtividade foram obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), extraindo dados da Produção Agrícola Municipal (PAM), no período compreendido entre 1990 a 2019. A planilha foi retirada do Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA e pode ser acessada por meio do endereço eletrônico: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612>.

4.4 Dados de Pressão da Atmosfera, Vento em 850 hPa e Temperatura da Superfície do Mar (TSM)

Foram utilizadas temperaturas mensais de TSM na área dos Niños: Niño 1+2 (0-10°S, 90°W-80°W), Niño 3 (5°N-5°S, 150°W-90°W), Niño 3.4 (5°N-5°S, 170°W-120°W) e Niño 4 (5°N-5°S, 160°E-150°W) (Figura 6), temperaturas mensais do Atlântico Tropical Norte (ATN), na área compreendida entre 5°N-23,5°N e 15°W-57,5°W, e temperaturas mensais do Atlântico Tropical Norte (ATN), na área compreendida entre 5°N-23,5°N e 15°W-57,5°W, e temperaturas mensais do Atlântico Tropical Sul (ATS), na área compreendida entre 0-20°S e 10°E-30°E (Figura 8), de janeiro de 1990 a dezembro de 2019.



Niño 4: 5°N-5°S, 160°E-150°W.

Figura 6. Localização das 4 regiões do El Niño na Bacia do Pacífico, adaptada. Fonte: http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/nino_regions.shtml.

As temperaturas nas áreas do Atlântico Tropical Norte (ATN) e Atlântico Tropical Sul (ATS) correspondem à região associada ao padrão de Dipolo do Atlântico Tropical (MOURA & SHUKLA, 1981; SERVAIN, 1991). Os dados de índices de ventos alísios mensais em 850 hPa no Oceano Pacífico Equatorial nas seguintes áreas: Pacífico Central (5° N-5°S, 175°W-140°W), Pacífico Este (5°N-5°S, 135°W-150°W) e Pacífico Oeste (5°N-5°S, 135°E-180°W) (Figura 6) e os dados de pressão atmosférica mensais à superfície das localidades Darwin e Tahiti (Figura 7) também foram utilizados para o mesmo período.

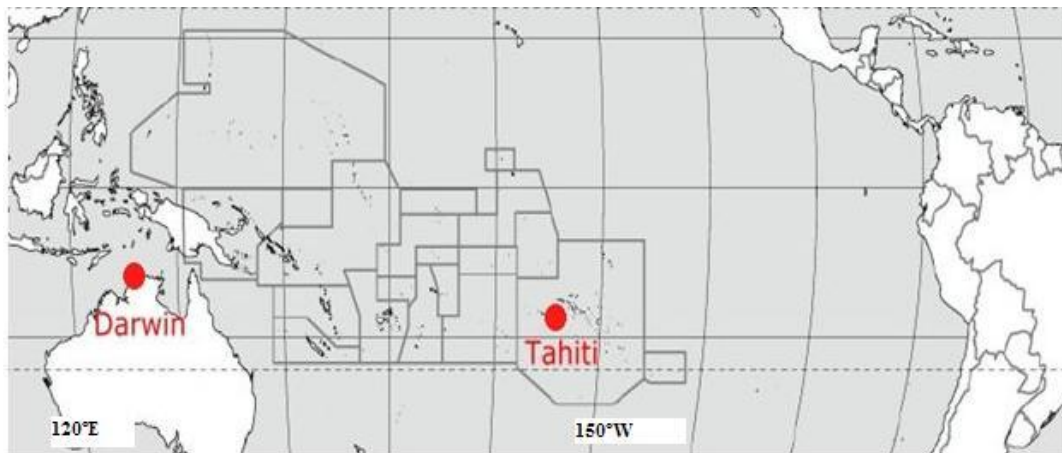
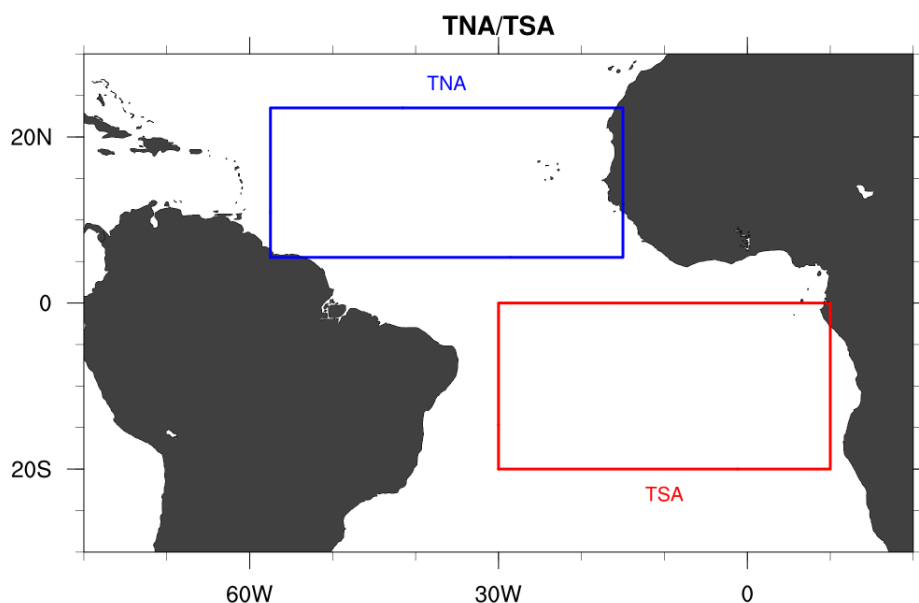


Figura 7. Localização da pressão atmosférica mensais à superfície das localidades Darwin e Tahiti. Fonte: <https://open.uj.edu.pl/mod/page/view.php?id=1396>.



TNA: *Tropical North Atlantic*. TSA: *Tropical South Atlantic*

Figura 8. Localização das regiões de temperatura da superfície do mar do Oceano Atlântico.
Fonte: <https://www.wmolc.org/contents/index/Climate+Indices>

Todos os dados TSM, ventos alísios, pressão da atmosfera foram obtidos da base de dados do Climate Prediction Center – CPC, centro pertencente ao NCEP (National Centers for Environmental Prediction). Para estudar as correlações canônicas entre o rendimento agrícola de cada grupo homogêneo com os dados padronizados de TSM, vento e pressão atmosférica, as análises fundamentaram-se na série das médias de produtividade e dados defasados de médias de três meses de TSM, vento (WC, WE, WW) em 850 hPa no Pacífico equatorial e pressão da atmosfera em Tahiti e Darwin para o período de 1990 a 2019.

Os dados dos Niños, que ocorre quando a temperatura da superfície do mar no Oceano Pacífico Equatorial se torna mais quente (ou frio, La Niña) do que o normal, pode afetar o clima em todo o mundo. Na América do Sul e consequentemente no Brasil, o El Niño pode ter um impacto significativo na produção agrícola e na precipitação. Durante o El Niño, as condições de precipitação tendem a mudar em muitas áreas do mundo. Algumas regiões podem receber chuvas intensas e outras podem experimentar uma seca prolongada. Essas mudanças na precipitação podem ter um grande impacto na produção agrícola. Tal como a influencia da temperatura da superfície do mar o Índice de Oscilação Sul (IOS) provocado pela diferença de pressão da atmosfera em Tahiti e Darwin, é um importante fator que influencia o clima em todo o mundo. O IOS é além de um fenômeno de grande escala caracterizado pela diferença de pressão padronizada nas regiões de Darwin e de Taiti, pode provocar o enfraquecimento ou intensificação dos ventos alísios sobre o oceano Pacífico Equatorial. A Área de Dipolo do Atlântico Norte e Sul que se refere às variações na temperatura da superfície do mar nas regiões do Atlântico Norte e Sul, afetam os padrões de circulação atmosférica e podem ter um impacto significativo no clima em todo o mundo. Todos esses dados foram utilizados pois comprovadamente auxiliam a prever eventos climáticos em todo o mundo e consequentemente pode explicar as precipitações e uma maior ou menor produção agrícola no leste de Pernambuco, local de maior produção da cana-de-açúcar no estado e estão disponíveis gratuitamente na base de dados do CPC.

4.5 Correlações lineares

As correlações lineares foram feitas com os dados de produtividade de cada grupo com os dados de TSM (Média de TSM de três meses do Atlântico Norte

(MtsmAN), Média de TSM de três meses do Atlântico Sul (MtsmAS), Média do EN12 de três meses (MEN12), Média do EN3 de três meses (MEN3), Vento em 850 hPa (Média do índice de ventos alísios central Pacífico Equatorial de três meses (MedWC), Média do índice de ventos alísios leste Pacífico Equatorial de três meses (MedWE), Média do índice de ventos alísios oeste Pacífico Equatorial de três meses (MedWW) e Pressão da atmosfera (Média da pressão atmosférica à superfície em Darwin de três meses (Mdarwin), Média da pressão atmosférica à superfície em Tahiti de três meses (Mtahiti)).

As correlações foram feitas entre as produtividades médias anuais com as variáveis defasadas de três meses (Novembro a Janeiro) de TSM, vento e pressão.

4.6 Análise de Correlação Canônica (ACC)

A Análise Correlação Canônica caracteriza-se por avaliar relações entre dois grupos influenciados, no mínimo, por dois caracteres. De maneira genérica, considera-se que o primeiro grupo é estabelecido por p caracteres e o segundo por q . O número de correlações canônicas é igual ao menor número de caracteres que constitui um dos grupos (p ou q) e sua magnitude sempre decresce com a ordem em que são estimadas. Entretanto, o primeiro coeficiente é sempre maior ou igual, em valor absoluto, a qualquer coeficiente de correlação simples ou múltipla, entre os caracteres do primeiro e do segundo grupo.

A ACC é baseada na determinação de variáveis canônicas ortogonais, por isso as variáveis em cada grupo devem ser linearmente independentes. Se esta condição não for satisfeita de início, é necessário descartar as variáveis que são combinações lineares das demais (variáveis redundantes).

4.6.1 Variável Canônica e Correlação Canônica

Sejam dois grupos de variáveis X_1 e X_2 , definidos como sendo que: $X_1 = (x_1, x_2, \dots, x_p)$ é o vetor de medidas de p características que constituem o grupo I, e $X_2 = (x_1, x_2, \dots, x_q)$ é o vetor das medidas de q características que constituem o grupo II.

Considerando X_1 e X_2 juntamente, temos o vetor $X((p+q) \times 1)$ e a matriz de covariância Σ conforme apresentados nas Equações 3 e 4.

$$\mathbf{X}_{((p+q) \times 1)} = \begin{bmatrix} X_1^{(1)} \\ X_2^{(1)} \\ \vdots \\ X_p^{(1)} \\ X_1^{(2)} \\ X_2^{(2)} \\ \vdots \\ X_q^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}^{(1)} \\ \mathbf{X}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_{11} & \vdots & \Sigma_{12} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Sigma_{21} & \vdots & \Sigma_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$\begin{matrix} \text{---} & \text{---} & \text{---} \\ \text{---} & \text{---} & \text{---} \\ \text{---} & \text{---} & \text{---} \end{matrix}$

Assim, os pq elementos de Σ_{12} medem a associação entre os dois grupos. O objetivo é concentrar a atenção em algumas poucas combinações lineares de variáveis pertencentes a X^1 e X^2 , ao invés de se trabalhar com todas as covariâncias contidas em Σ_{12} . Adotando-se a notação utilizada por Anderson (1984), sejam U e V , combinações lineares das variáveis X^1 e X^2 , respectivamente definidas pelas Equações (5), (6), (7), (8) e (9).

$$U = \mathbf{a}'\mathbf{X}^1 \quad (U = a_1x^1 + a_2x^1 + \dots + a_px^1) \quad (5)$$

$$V = \mathbf{b}'\mathbf{X}^2 \quad (V = b_1x^2 + b_2x^2 + \dots + b_qx^2) \quad (6)$$

em que, $\mathbf{a}' = [a_1, a_2, \dots, a_p]$ é o vetor $1 \times p$ de pesos das características do grupo I; e $\mathbf{b}' = [b_1, b_2, \dots, b_q]$ é o vetor $1 \times q$ de pesos das características do grupo II.

$$\text{Var}(U) = \mathbf{a}' \cdot \text{Cov}(\mathbf{X}^1) \cdot \mathbf{a} = \mathbf{a}' \cdot \Sigma_{11} \cdot \mathbf{a} \quad (7)$$

$$\text{Var}(V) = \mathbf{b}' \cdot \text{Cov}(\mathbf{X}^2) \cdot \mathbf{b} = \mathbf{b}' \cdot \Sigma_{22} \cdot \mathbf{b} \quad (8)$$

$$\text{Cov}(U, V) = \mathbf{a}' \cdot \text{Cov}(\mathbf{X}^1, \mathbf{X}^2) \cdot \mathbf{b} = \mathbf{a}' \cdot \Sigma_{12} \cdot \mathbf{b} \quad (9)$$

Define-se como a primeira correlação canônica (r_1) aquela que maximiza a relação entre U_1 e V_1 . As funções U_1 e V_1 constituem o primeiro par canônico associado àquela correlação canônica que é expressa pela Equação 10.

$$r_1 = \text{Cor}(U_1, V_1) = \frac{\text{Cov}(U, V)}{\sqrt{\text{Var}(U)\text{Var}(V)}} = \sqrt{\lambda_1} \quad (10)$$

O primeiro par de variáveis canônicas é o par de combinações linear U_1, V_1 tendo variância igual a 1, que maximiza a correlação. O k par de variáveis canônicas é o par de combinações linear U_k, V_k tendo variância igual a 1, que maximiza a correlação entre todas escolhas que não são correlacionadas com os pares de variáveis canônicas anteriores ($k-1$). Aqui, λ_k são os autovalores. Para os casos em que se utilizam variáveis padronizadas, têm-se $\Sigma_{11} = R_{11}$, $\Sigma_{22} = R_{22}$ e $\Sigma_{12} = R_{12}$, em que R representa uma matriz de correlações.

$$R = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{pmatrix} \quad (11)$$

O primeiro passo é a determinação dos autovalores que podem ser obtidos pela equação $|R_{11}^{-1} R_{12} R_{22}^{-1} R_{21} - \lambda I| = 0$. Na sequência calculam-se os autovetores (a e b) que seguem diretamente da equação do autovalor $R_{11}^{-1} R_{12} R_{22}^{-1} R_{21} a = \lambda a$ e $R_{11}^{-1} R_{12} R_{22}^{-1} R_{21} b = \lambda b$. A primeira correlação canônica entre a combinação linear das características dos grupos I e II é dada por $r_1 = \sqrt{\lambda_1}$ em que λ_1 é o maior autovalor da matriz $R_{11}^{-1} R_{12} R_{22}^{-1} R_{21}$ que é quadrada e não simétrica. As demais correlações e fatores canônicos foram estimados utilizando-se os autovalores e os autovetores das expressões descritas, de ordem correspondente a p ou q -ésima correlação estimada. O critério adotado para verificar a significância da hipótese de que todas as possíveis correlações canônicas são nulas ($H_0: r_1=r_2... r_s=0$), com s = menor (p ou q) e n =número de observações, foi avaliado pelo teste aproximado de χ^2 (Trugilho et al., 2003), dado pela Equação 12.

$$\chi^2 = - [n - 0,5 (p + q + 3)] \log_e \left[\prod_{i=1}^s (1 - r_i^2) \right] \quad (12)$$

A estatística está associada a pq graus de liberdade. Se a hipótese é rejeitada, testa-se a hipótese $H_0: r_k > 0$ e $r_{k+1} = r_{k+2} = \dots r_s = 0$, por meio da Equação 13.

$$\chi^2 = - [n - 0,5 (p + q + 3)] \log_e \left[\prod_{i=k+1}^s (1 - r_i^2) \right] \quad (13)$$

que está associado a χ^2 com $(p-k)(p-k)$ graus de liberdade. Somente as raízes estatisticamente significativas foram usadas para os subsequentes estudos sobre pares canônicos.

4.6.2 Interpretação das Variáveis Estatísticas Canônicas

Os coeficientes de correlação canônica (r) são as raízes quadradas dos autovalores $r_k = \sqrt{\lambda_k}$ e podem ser interpretados como coeficientes de correlação. Sendo as correlações associadas as variáveis canônicas, estas são chamadas de correlações canônicas. Como índice para controle do grau de correlação canônica entre os dois grupos de variáveis é usual adotar o maior coeficiente de correlação. Entretanto, as outras variáveis canônicas também podem ser significativas e fornecer interpretações.

Os autovalores (λ) podem ser interpretados como a parcela de variância compartilhada entre as respectivas variáveis canônicas.

Os coeficientes de cada função canônica denominam-se coeficientes canônicos (ou canonical loading) e medem a correlação linear simples entre uma variável original observada no grupo I ou II e o par canônico. Esse coeficiente reflete a variância que a variável observada compartilha com o par ou variável canônica. Quanto maior o coeficiente canônico, maior é a importância da variável no grupo. O quadrado das cargas de correlação canônica pode ser usado para estimar a parcela de variância compartilhada pelas variáveis canônicas em cada grupo. Se o grupo I tem p variáveis e o grupo II q variáveis, r^2 é a correlação canônica ao quadrado; multiplicando esse valor pela parcela da variância extraída (Equações (14) e (15)), obtêm-se a estimativa chamada “redundância”, ou seja, quão superpostas são as variáveis dos grupos.

$$\text{Redundância}_{\text{grupo I}} = [\sum (\text{cargas}_{\text{grupo I}}^2) / p] * r^2 \quad (14)$$

$$\text{Redundância}_{\text{grupo II}} = [\Sigma (\text{cargas}_{\text{grupo II}}^2)/q] * r^2 \quad (15)$$

A redundância será útil para avaliar a significância prática das raízes canônicas. Com amostras grandes, correlações canônicas próximas de $r = 0,30$ podem ser estatisticamente significativas. O quadrado deste coeficiente ($r^2 = 0,09$) usado na expressão de redundância indicaria que as raízes canônicas são responsáveis somente por um pouco de variabilidade nas variáveis. A avaliação da significância é subjetiva por natureza. Mas, para avaliar a participação de uma raiz canônica na variância (ou, nas variáveis), é importante a medida de redundância, ou seja, quanto de variabilidade em um grupo é explicado pelo outro.

Quando identificado um outliers, este foi checado e eliminado caso verificado comprometimento dos dados. Os outliers representam valores esporádicos que não representam à base de dados como um todo, mas sim um evento que pode ter sido realmente medido, porém único, ou uma contaminação na medida.

Os valores faltantes (missing) no banco de dados foram estimados. Segundo pode-se estimar até no máximo 25% de valores faltantes de uma variável, sem correr o risco de alterações significativas na tendência média dos dados. Os valores faltantes de produtividade foram estimados por regressão linear (múltipla ou simples) dentro do grupo homogêneo. Todas as variáveis com valores estimados apresentaram um modelo estatístico adequado, ou seja, correlação significativa com as variáveis de referência e distribuição normal e constante dos resíduos. As variáveis que possuíam até 15% dos valores faltantes foram estimadas.

No trabalho foram utilizados três métodos para interpretação das variáveis canônicas: (1) pesos canônicos (coeficientes padronizados), (2) cargas canônicas (correlações estruturais) e (3) cargas cruzadas canônicas. Para as correlações canônicas e lineares foi utilizado o software STATÍSTICA 12.0.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise de Agrupamento

A partir da análise de agrupamento utilizando o método hierárquico de Ward (Ward, 1963), foi determinado três grupos homogêneos descritos na Figura 9 apresenta os três grupos.

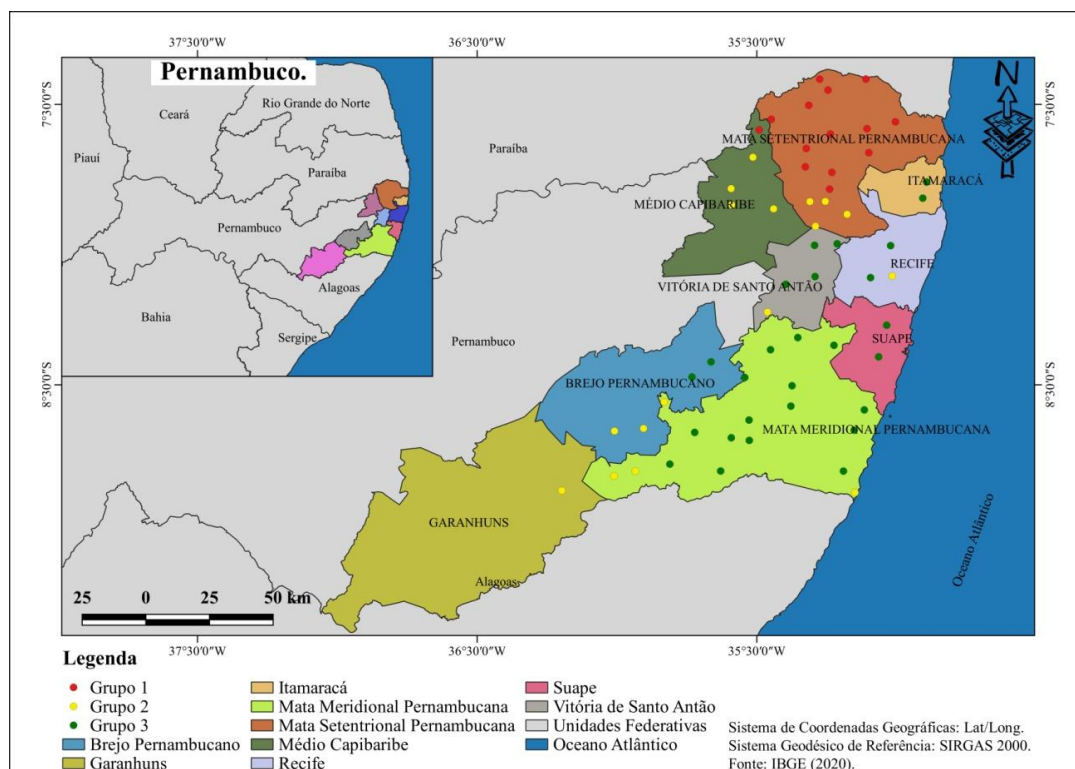


Figura 9. Localização dos grupos homogêneos e microrregiões de Pernambuco, os pontos vermelho representa o Grupo 1, o amarelo o Grupo 2 e de verde o Grupo 3.

As localidades da mata meridional concentradas no Grupo 3, é uma região que caracteriza o setor canavieiro e possui topografia com declividade mais acentuada que a mata setentrional, embora com maior precipitação a produtividade é menor, ainda que por fatores não necessariamente climáticos, mas também relacionados com o manejo dispensado, que é majoritariamente manual e menos intenso.

No Grupo 2 encontram-se a maioria dos municípios das áreas de transição entre a zona da mata e agreste e nota-se essa distribuição ao longo da faixa transversal do estado. O Grupo 1 estão as localidades que se encontram ao norte do estado, zona da mata setentrional, e a região da mata pernambucana onde chove menos, mas também é uma região caracterizada por possuir maior facilidade de mecanização, consequentemente possui um manejo facilitado em relação as outras áreas de produção do estado.

A análise hierárquica de agrupamento, representada pelo dendrograma, ver Figura 10, produziu três grupos de homogêneos de produtividade da cana-de-açúcar localizados em diferentes municípios, que estão descritos na Tabela 1.

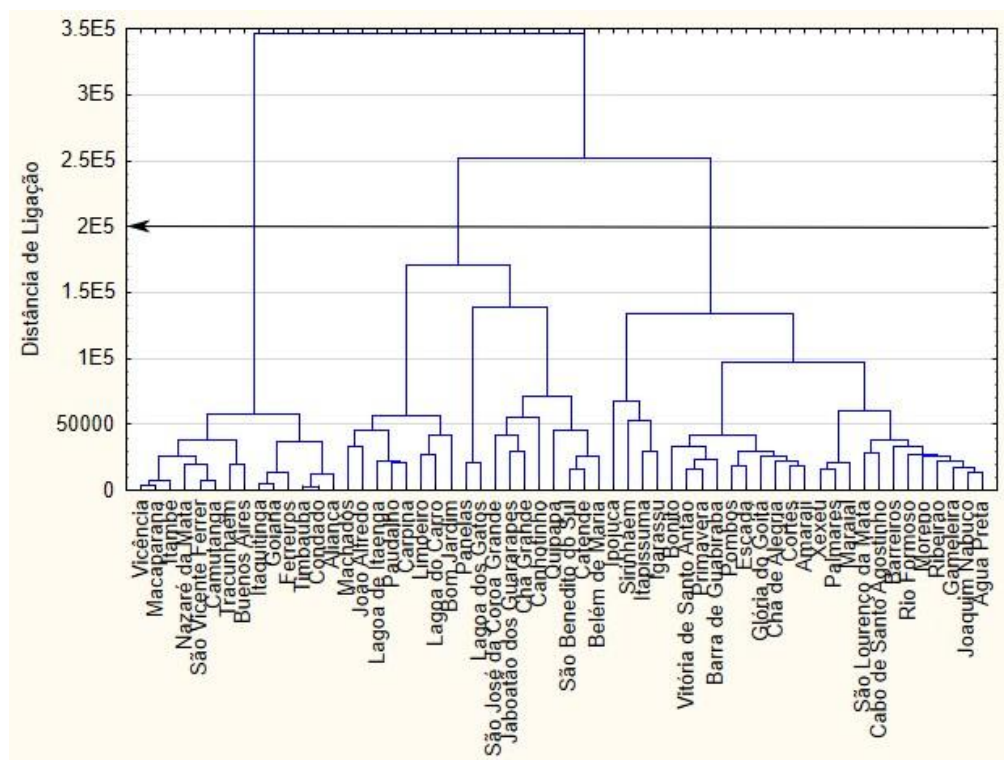


Figura 10. Dendrograma resultante da análise de agrupamento, utilizando-se o método de Ward e distância euclidiana para 58 municípios do setor leste de Pernambuco no período de dados de 1990 a 2019.

Tabela 1. Relação dos municípios dos grupos homogêneos.

Grupo	Municípios
Grupo 1	Aliança, Buenos Aires, Camutanga, Condado, Ferreiros, Goiana, Itambé, Itaquitinga, Macaparana, Nazaré da Mata, São Vicente Férrer, Timbaúba, Tracunhaém, Vicência.
Grupo 2	Belém de Maria, Bom Jardim, Canhotinho, Carpina, Chã Grande, Jaboatão dos Guararapes, João Alfredo, Lagoa do Carro, Lagoa de Itaenga, Lagoa dos Gatos, Limoeiro, Machados, Panelas, Paudalho, Quipapá, São Benedito do Sul, São José da Coroa Grande.
Grupo 3	Água Preta, Amaraji, Barra de Guabiraba, Barreiros, Bonito, Cabo de Santo Agostinho, Catende, Chã de Alegria, Cortês, Escada, Gameleira, Glória do Goitá, Igarassu, Ipojuca, Itapissuma, Joaquim Nabuco, Maraial, Moreno, Palmares, Pombos, Primavera, Ribeirão Rio Formoso, São Lourenço da Mata, Sirinhaém, Vitória de Santo Antão, Xexéu.

Estes municípios pertencem a nove microrregiões do estado de Pernambuco: Brejo Pernambucano, Garanhuns, Itamaracá, Mata Meridional Pernambucana, Mata Setentrional Pernambucana, Médio Capibaribe, Recife, Suape e Vitória de Santo Antão. Dentre estas, as principais microrregiões produtoras são a mata meridional e setentrional. Na Tabela 2, observa-se os resultados da análise descritiva dos dados de produtividade para os três grupos de municípios no período de 1990 a 2019.

Tabela 2. Estatística descritiva dos grupos homogêneos.

	GrupProd1	GrupProd2	GrupProd3
Média	52033,4505	43184,86052	49293,44098
Erro padrão	1234,79954	1031,217178	675,0972361
Mediana	53335,8571	43122,03125	49444,38889
Desvio padrão	6763,27559	5648,209098	3697,659847
Variância da amostra	45741896,8	31902266,02	13672688,35
Curtose	3,85150423	0,590880049	4,233031464
Assimetria	-1,6385021	-0,95573078	-1,343379644
Intervalo	32372,8022	20911,76471	20240,74074
Mínimo	28571,4286	29264,70588	36283,22222
Máximo	60944,2308	50176,47059	56523,96296
Soma	1561003,52	1295545,816	1478803,229
Contagem	30	30	30

O grupo de homogêneo de produtividade 1 (GruPro1), concentrou as maiores médias de produtividade, assim como erro e desvio padrão maiores. O segundo grupo de produtividade (GruPro2) agrupou os menores valores de produtividade, com de erro e desvio padrão intermediários. O terceiro grupo de produtividade (GruPro3) agrupou os valores intermediários em contrapartida teve o menor erro e desvio padrão apresentado.

5.2 Análises das correlações lineares para atraso de 3 meses.

Para analisar a correlação e evitar possíveis efeitos de multicolinearidade e autocorrelação entre as variáveis selecionadas durante o processo de escolha dos preditores, foram determinadas as correlações lineares entre as variáveis meteorológicas.

Na Tabela 3 pode-se constatar que a análise de correlação linear não demonstrou correlações significativas entre as produtividades do grupo 1(GruPro1), 2(GruPro2) e 3(GruPro3) com as variáveis preditoras testadas. Assim, o grau de relacionamento entre os fatores analisados, chegou-se a resultados de uma relação positiva, porém fraca, entre os conjuntos de variáveis. As correlações significativas (acima de 0,36) ocorreram entre as próprias variáveis preditoras testadas: MtsmAN, MtsmAS, Mdarwin, Mtahiti, Men12, MEN3, MEN4, MedWE, MedWW, MedWC. Assim, a análise de correlação foi insuficiente para detectar maiores relações entre os grupos sobre a produtividade e as variáveis meteorológicas, o que justifica o emprego da análise de correlações canônicas para verificar se a correlação entre essas combinações é máxima.

Para Mazouz, Assani & Rodríguez (2013) a correlação intragrupo resultante implica que as observações individuais não são totalmente independentes, conforme exigido pelos modelos estatísticos convencionais. Ainda para esses autores a autocorrelação, enfraquece ainda mais a presunção de independência, que nas análises hidroclimatológicas geralmente requerem componentes espaciais e temporais a serem incluídos na análise.

A partir dessas correlações lineares, identificaram-se entre as próprias variáveis independentes de TSM, vento e pressão, correlações mais significativas ($> |0,4|$), do que com relação às variáveis dependentes, essa correlação a princípio não demonstrou alto grau de linearidade entre os grupos de variáveis (dependentes e independentes), a análise foi significativa em $p < 0,05$ com teste estatístico de distribuição t de Student.

Tabela 3. Média, desvio padrão e correlações lineares de GPro1, GPro2, GPro3, MtsmAN, MtsmAS, Mdarwin, Mtahiti, Men12, MEN3, MEN4, MEN34, MedWE, MedWW, MedWC, atraso de 3 meses.

	Média	Desvio	GPro1	GPro2	GPro3	medtsmAS-3	tsmANmed-3	meddarwin-3	medtahiti-3	meden12-3	medEN3-3	medEN4-3	medEN34-3	medWC-3	medWE-3	medWW-3
GPro1	52033,45	6763,276	1,00000	0,54489	0,356456	0,261207	0,165687	0,046602	0,088606	0,085906	0,153215	0,156920	0,162993	0,019977	-0,291623	0,187039
GPro2	43184,86	5648,209		1,00000	0,779029	0,268745	0,255704	-0,030316	0,149368	-0,158849	0,017502	0,194250	0,090835	0,216019	0,032200	0,028911
GPro3	49293,44	3697,66			1,000000	0,360124	0,197221	0,073072	0,206464	-0,038758	0,074694	0,087146	0,107829	0,095633	-0,004381	-0,035623
medtsmAS-3	24,76	0,320				1,000000	0,307549	0,185700	-0,161525	0,565345	0,497048	0,255617	0,387519	-0,201993	-0,447102	0,073978
tsmANmed-3	26,95	0,342					1,000000	-0,181889	0,117943	-0,059787	-0,115333	-0,099006	-0,156935	0,241784	0,000362	0,406245
meddarwin-3	7,51	0,925						1,000000	-0,720490	0,730001	0,816726	0,810703	0,865368	-0,876304	-0,616678	-0,797099
medtahiti-3	11,34	0,964							1,000000	-0,559497	-0,680349	-0,812404	-0,758000	0,809550	0,507510	0,682716
meden12-3	23,01	1,096								1,000000	0,925588	0,623044	0,833677	-0,787352	-0,879863	-0,390645
medEN3-3	25,33	1,169									1,000000	0,827776	0,970121	-0,837550	-0,860185	-0,544353
medEN4-3	28,51	0,807										1,000000	0,922836	-0,746061	-0,580293	-0,749427
medEN34-3	26,62	1,161											1,000000	-0,859363	-0,788490	-0,679228
medWC-3	8,36	2,483												1,000000	0,758209	0,734576
medWE-3	9,07	1,327													1,000000	0,289949
medWW-3	1,44	2,203														1,000000

*Correlações com fonte em negrito são significativas em $p < 0,0500$

5.3 Significância estatística e prática para o atraso de 3 meses.

O primeiro teste de significância estatística foi feito para as correlações canônicas de cada uma das três funções canônicas. A única correlação canônica estatisticamente significativa é a primeira (Tabela 4). Além de testes de cada função canônica separadamente, testes multivariados das funções simultaneamente também foram executados. Utilizou-se o teste multivariado de significância lambda de Wilks para avaliar a significância das raízes canônicas conjuntamente.

Tabela 4. Análise de correlação canônica, teste multivariado de significância¹.

Função canônica	R	R ²	χ^2	df	p	Lambda Wilks
1	0,82	0,67	44,18	27	0,02	0,14
2	0,62	0,38	19,37	16	0,25	0,42
3	0,56	0,32	8,62	7	0,28	0,68

Na Tabela 4 também, encontra-se detalhada as estatísticas de teste multivariado, as quais indicam que as funções canônicas, tomadas coletivamente, são estatisticamente significantes com p-valor $\leq 0,05$, porém individualmente as correlações das funções 2 e 3 com baixa significância, com p-valor de 0,25 e 0,28, respectivamente.

A estatística de teste lambda de Wilks, mostra 0,14 para função 1, enquanto que função 2 e 3, 0,42 e 0,68, respectivamente. Quanto mais próximo de zero o teste lambda de Wilks for, implica que os dois conjuntos de dados são bem correlacionados.

Além da significância estatística, as correlações canônicas tinham tamanho suficiente para serem consideradas com significância prática. A quantidade de variância explicada, ou seja, o percentual de variância na variável estatística canônica dependente que pode ser explicada pela variável estatística canônica independente, e vice-versa, foi determinada elevando-se ao quadrado a correlação canônica (R² canônico).

Embora não se tenha trabalhos na literatura, com o mesmo tipo de análise aplicada a cana-de-açúcar, nem valores considerados referenciais para correlação canônica e correlação canônica ao quadrado, podemos inferir como valores consideravelmente alto, pois numa simples comparação a regressão linear, a variância total na variável dependente é igual a 1 (100%), porém em correlação canônica por lidar simultaneamente com conjuntos de variáveis dependentes, não pode ser assumido que a variância total explicada seja de 100%, portanto os valores esperados são menores.

¹ R: Correlação canônica; R²: Raiz canônica, autovalor, correlação canônica ao quadrado; χ^2 : Qui-quadrado; df: graus de liberdade; P: P-valor; Lambda wilks: varia de 0 a 1, onde 0 indica uma diferença completa entre os grupos e 1 indica nenhuma diferença entre os grupos.

5.4 Análise de redundância para atraso de 3 meses.

A Redundância expressa quanto da variância em um conjunto de variáveis pode ser explicada pelo outro; é uma medida da proporção média de variância no conjunto Y que é contabilizada pelo conjunto X e é comparável à correlação múltipla quadrada na regressão linear múltipla (AFIFI & CLARK, 1996).

Um índice de redundância foi calculado para as variáveis estatísticas independente e dependente da primeira função na Tabela 5. A quantidade de variância compartilhada entre as variáveis observadas dependentes e independentes e as suas respectivas variáveis estatísticas canônicas foi determinada, elevando-se ao quadrado as cargas canônicas.

Tabela 5. Cálculo dos índices de redundância para a primeira função canônica.

Variáveis	Carga canônica	Carga canônica quadrada	Carga canônica quadrada média	R ² canônico	Índices de redundância
Dependentes					
GruPro1	0,6676	0,4457			0,2966
GruPro2	0,9490	0,9006			0,5994
GruPro3	0,8858	0,7846			0,5222
Soma da carga canônica quadrada		2,1309	0,7103	0,6655	0,4727*
Independentes					
MtsmAS	0,4267	0,1821			0,1212
MtsmAN	0,3033	0,0828			0,0612
Mdarwin	0,0347	0,0005			0,0008
Mtahiti	0,2222	0,0337			0,0329
MEN12	-0,0875	0,0035			0,0051
MEN3	0,0964	0,0119			0,0062
MedWC	0,1840	0,0267			0,0225
MedWE	-0,0735	0,0188			0,0036
MedWW	0,0570	0,0121			0,0022

Soma da carga
canônica
quadrada

0,4488 0,0408 0,0017 0,0284*

*Valor médio.

O índice de redundância desenvolvido por Stewart e Love (1968) é uma medida para investigar inter-relações entre dois conjuntos de variáveis e é importante na interpretação da análise canônica (SUZUKAWA & TANEICHI, 2002). Os autores Mazouz, Assani & Rodríguez (2013), explicam que o índice de redundância é uma análise assimétrica que examina como um conjunto de variáveis dependentes Y se relaciona com um conjunto de variáveis independentes X . Ainda para esses autores em princípio, o índice de redundância e a ACC podem produzir resultados diferentes, porque no primeiro, Y explicado por X , em vez da correlação entre Y e X como na ACC.

Como pode ser visto, o índice de redundância para cada variável dependente, variou de 30 a 60%, tendo a variável do grupo homogêneo1 (GruPro1) apresentando 30%, GruPro2 com 60%, sendo portanto a variável dependente com maior poder de explicação e a GruPro3 que apresentou 52%, assim o índice de redundância médio para a variável estatística dependente foi de 0,4727, demonstrando que 47% da variação do grupo dependente pode ser explicado pelas variáveis independentes que foram estudadas. Os valores dos índices de redundância, foi menor representando 30%, justamente no grupo 1, onde os municípios pertencem a zona da mata norte, mata setentrional, conhecida por ter menos variações climáticas com característica mais seca, quando comparada aos municípios da zona da mata sul, que conforme a análise de agrupamento concentrou o grupo 2, apresentando índice de redundância de 52%. O maior índice (60%) ocorreu em áreas de transição da zona da mata e agreste com características de topografia e solos variáveis em relação aos outros dois grupos, além de menores médias de produtividade, que pode ser relacionado não apenas ao ambiente de produção, mas também ao manejo dispensado ser menor, o que nessa região pode-se inferir que a cultura respondeu melhor as variações climáticas apresentadas no período, dando maior grau de acurácia na predição por pouca influencia de manejo.

Pode-se observar que a variável estatística independente tem um índice de redundância médio, consideravelmente menor (0,0284), apesar de, nesse caso, como há uma clara fronteira entre as variáveis dependentes e independentes, esse valor menor não deve ser considerado inesperado.

A baixa redundância da variável estatística independente resulta da variância compartilhada relativamente baixa na variável estatística independente (0,0284), e não do R^2 canônico. Segundo Hair Junior et al. (2005), as cargas canônicas (ou correlações estruturais canônicas) medem a correlação linear simples entre uma variável original observada no conjunto dependente ou independente e a variável estatística canônica do seu respectivo conjunto. Quanto maior a carga, mais importante é a variável para derivar a variável estatística canônica. A partir da análise de redundância e dos testes de significância estatística, a primeira função foi aceita.

A análise de redundância para a segunda e terceira função produz resultados bem diferentes (Tabela 6). Primeiro, os R^2 canônicos são menores 0,3787 e 0,3191, para segunda e terceira função, respectivamente. Além disso, nota-se que os conjuntos de variáveis têm baixa variância compartilhada na segunda e terceira função (0,1635 e 0,1811 para as variáveis estatísticas dependentes e 0,1201 e 0,0401 para as variáveis estatísticas independentes).

A combinação delas com a raiz canônica no índice de redundância produzem valores de 0,0619 e 0,0578 para as variáveis estatísticas dependentes e 0,0455 e 0,0128 para as variáveis estatísticas independentes. Logo, a segunda e terceira função não são estatisticamente significantes, e não tem significância prática.

Tabela 6. Análise de redundância de variáveis estatísticas dependentes e independentes para as funções canônicas.

Variância padronizada das variáveis dependentes explicada					
Por sua própria variável estatística canônica (variância compartilhada)			Pela variável estatística canônica oposta (redundância)		
Função canônica	Proporção	Proporção cumulativa	R^2	Proporção	Proporção cumulativa
1	0,6554	0,6554	0,6655	0,4362	0,4362
2	0,1635	0,8189	0,3787	0,0619	0,4981
3	0,1811	1,000	0,3191	0,0578	0,5559
Variância padronizada das variáveis independentes explicada					
Por sua própria variável Estatística canônica (variância compartilhada)			Pela variável estatística canônica oposta (redundância)		
Função canônica	Proporção	Proporção cumulativa	R^2	Proporção	Proporção cumulativa
1	0,0191	0,0191	0,6655	0,0127	0,0127
2	0,1201	0,1392	0,3787	0,0455	0,0582
3	0,0401	0,1794	0,3191	0,0128	0,0710

De forma semelhante, Mazouz, Assani & Rodríguez (2013), justificam uso dessa abordagem estatística (índice de redundância) pela falta de independência causada por correlações dentro do grupo e temporais nos dados de séries temporais do índice climático e a ênfase do índice em explicar o efeito do conjunto independente no dependente conjunto, em vez da correlação entre os dois conjuntos como no ACC.

5.5 Interpretação das variáveis estatísticas canônicas para atraso de 3 meses.

5.5.1 Pesos canônicos

Na Tabela 7 estão representados os pesos canônicos padronizados para cada variável estatística canônica para as variáveis dependentes e independentes. A magnitude dos pesos representa sua contribuição relativa para com a variável estatística. Com base no tamanho dos pesos, a ordem de contribuição de variáveis independentes para a primeira variável estatística é MEN12, MEN3, MedWE, Mdarwin, MtsmAS, MedWC, Mtahiti, MedWW e MtsmAN e a ordem de variáveis dependentes na primeira variável estatística é GruPro2, GruPro3 e GruPro1. Observando as funções 2 e 3 percebe-se que não segue as mesmas ordens. Como os pesos canônicos são geralmente instáveis, particularmente em casos de multicolinearidade, devido ao fato de que seu cálculo apenas aperfeiçoa a correlação canônica, a carga canônica e a carga cruzada se tornam mais adequadas.

Tabela 7. Pesos canônicos para as três funções canônicas.

Coefficientes canônicos padronizados para as variáveis independentes	Pesos canônicos		
	Função 1	Função 2	Função 3
GruPro1	0,2544	1,0412	-0,5457
GruPro2	0,4859	-1,5050	-0,8432
GruPro3	0,4166	0,8277	1,3147
Coefficientes canônicos padronizados para as variáveis dependentes	Função 1	Função 2	Função 3
MtsmAS	0,8243	0,3287	0,4054
MtsmAN	-0,0465	-0,3847	0,2834
Mdarwin	0,9806	1,0991	-0,5930
Mtahiti	0,5113	0,5564	1,3655

MEN12	-2,3312	-0,2823	0,5105
MEN3	1,0140	-0,9627	0,2567
MedWC	0,6518	-1,2415	-1,9951
MedWE	-0,9910	-0,5345	1,6829
MedWW	-0,1420	1,2590	-0,5408

O par para a primeira função das variáveis canônica gerou as seguintes Equações:16 e 17:

$$U1 = 0,2544 \text{ GruPro1} + 0,4859 \text{ GruPro2} + 0,4166 \text{ GruPro3} \quad (16)$$

$$V1 = 0,8243 \text{ MtsmAS} - 0,0465 \text{ MtsmAN} + 0,9806 \text{ Mdarwin} + 0,5113 \text{ Mtahiti} - 2,3312 \text{ MEN12} + 1,0140 \text{ MEN3} + 0,6518 \text{ MedWC} - 0,9910 \text{ MedWE} - 0,1420 \text{ MedWC} \quad (17)$$

5.5.2 Cargas canônicas

As cargas canônicas para as variáveis estatísticas dependente e independente para as três funções canônicas estão apresentadas na Tabela 8.

Na primeira variável estatística dependente, as variáveis têm cargas que excedem 0,66, o que resulta em variância compartilhada elevada. Isso indica um alto grau de intercorrelação entre as três variáveis e sugere que estas medidas são representativas.

Tabela 8. Estrutura canônica para as três funções canônicas.

	Cargas canônicas		
	Função 1	Função 2	Função 3
Correlações entre as variáveis dependentes e suas variáveis estatísticas canônicas			
GruPro1	0,6676	0,5161	-0,5365
GruPro2	0,9490	-0,2929	-0,1164
GruPro3	0,8858	0,0264	0,4633
Correlações entre as variáveis independentes e suas variáveis estatísticas			
MtsmAS	0,4267	0,2682	0,1892
MtsmAN	0,3033	-0,0810	-0,0837
Mdarwin	0,0347	0,2515	0,1696

	Mtahiti	0,2222	0,0628	0,1708
	MEN12	-0,0875	0,4824	0,0643
	MEN3	0,0964	0,3179	0,0001
	MedWC	0,1840	-0,3654	-0,1199
	MedWE	-0,0735	-0,5776	0,2234
	MedWW	0,0570	0,1980	-0,3075
Cargas cruzadas canônicas				
		Função 1	Função 2	Função 3
Correlações entre as variáveis dependentes e variáveis estatísticas canônicas independentes				
	GPro1	0,5447	0,3176	-0,3031
	GPro2	0,7742	-0,1802	-0,0657
	GPro3	0,7226	0,0162	0,2617
Correlações entre as variáveis independentes e variáveis estatísticas canônicas dependentes				
	MtsmAS	0,3481	0,1650	0,1069
	MtsmAN	0,2474	-0,0498	-0,0473
	Mdarwin	0,0283	0,1548	0,0958
	Mtahiti	0,1813	0,0387	0,0965
	MEN12	-0,0714	0,2969	0,0363
	MEN3	0,0786	0,1957	0,0000
	MedWC	0,1501	-0,2248	-0,0677
	MedWE	-0,0600	-0,3555	0,1262
	MedWW	0,0465	0,1218	-0,1737

A carga canônica da primeira função estatística independente tem um padrão diferente, em que as cargas variam de -0,0875 a 0,4267, sendo duas variáveis independentes com cargas negativas variando de -0,0875 e -0,0735. As cinco variáveis com as mais altas cargas na variável estatística independente são MtsmAS (0,4267), MtsmAN (0,3033), Mtahiti (0,2222), MedWC (0,1840) e MEN3 (0,0964). As variáveis estatísticas em correlação canônica são extraídas para maximizar objetivos preditivos e, portanto, ela corresponde mais aos resultados de outras técnicas de dependência. Supõe-se, que a primeira função canônica se aproxima de resultados de uma regressão múltipla, e a variável estatística independente representa o conjunto de variáveis que melhor prevê as três medidas dependentes, principalmente a GruPro2.

É possível notar, que os melhores preditores estudados são os campos de ventos no Pacífico central; pressão atmosférica em Tahiti; e os campos de TSM nas áreas do El Niño 3, TSM no Atlântico Norte e Atlântico Sul. O que não descarta a utilização de

preditores que reconhecidamente afetam a produtividade da cultura, tal como radiação, precipitação, temperatura. No entanto, os preditores utilizados possuem a vantagem de se obterem e relaciona-los com defasagem de até três meses, o que possibilita análises de forma macro, similar a prognósticos de precipitação.

Os baixos valores de redundância das variáveis estatísticas são exibidos nas cargas substancialmente menores para ambas as variáveis estatísticas na segunda e terceira função. Logo, a baixa resposta refletida nas cargas menores, juntamente com os baixos valores de redundância, reforçam a baixa significância prática da segunda e terceira função.

5.5.3 Cargas cruzadas canônicas

Na Tabela 8 estão expressas as cargas cruzadas para as três funções canônicas. Ao analisar a primeira função canônica, percebemos que as variáveis dependentes (GruPro1, GruPro2 e GruPro3) exibem correlações fortes com a variável estatística canônica independente (função 1): 0,5447, 0,7742 e 0,7226, respectivamente. Isso reflete uma moderada a alta variância compartilhada entre essas três variáveis. Elevando ao quadrado esses termos, descobrimos o percentual da variância para cada variável explicada pela função 1. Os resultados mostram que 30% da variância em GruPro1, 60% variância em GruPro2 e 52% da variância em GruPro3 que são explicados pela função 1. Olhando as cargas cruzadas das variáveis independentes, vemos que as correlações são menores que 0,4 e que as variáveis mais importantes são: MtsmAS (0,3481), MtsmAN (0,2474), Mtahiti (0,1813) MedWC (0,1501) e MEN3 (0,0786) que têm aproximadamente 12%, 6%, 3%, 2% e 1%, respectivamente, das variâncias que são explicadas pela variável estatística dependente. As outras variáveis têm correlações menores que 0,4, e isto implicam em baixa variância, e, portanto, baixa explicação da variável dependente. A última questão de interpretação foi examinar os sinais das cargas cruzadas. As variáveis independentes MtsmAS, MtsmAN, Mdarwin, Mtahiti, MEN3, MedWC e MedWW têm uma relação positiva, direta, já as variáveis MEN12, MedWE têm relação inversa com a função canônica dependente.

Nas últimas décadas, alguns pesquisadores também têm estudado a influência que as anomalias da TSM do oceano Atlântico Sul exercem no clima de grande parte da América do Sul, principalmente durante o verão (DIAZ, STUDZINSKI & MECHOSO, 1998). Estudos das variações de temperatura nas águas do Oceano Atlântico

comprovam a influência dos fenômenos oceânicos sob o ciclo hidrológico e salientam a importância de estudos sobre o comportamento pluviométrico, que é uma das essências para o manejo dos recursos naturais e, conseqüentemente, da boa condução das atividades humanas (OLIVEIRA & MARCUZZO, 2016). Corroborando com os resultados de forte influência da TSM tanto do Atlântico Sul quanto do Norte, e relacionando com a capacidade produtiva em função de maiores precipitações pluviométricas, Fischer, Diniz & Marques. (2008) ressaltam que diversos estudos foram realizados por pesquisadores acerca da previsão climática no Brasil, indicando que a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) é um dos principais indicadores das variações de precipitação e temperatura, e, por isso, é um importante fator de influência.

Evidenciado por Stockdale et al. (2010), o El Niño Oscilação Sul (ENOS) é um fenômeno que se manifesta na área do Oceano Pacífico Equatorial e tem impacto no clima e tempo de diversas regiões do mundo. O ENOS influencia ainda os ventos alísios na região do Pacífico Equatorial e a Oscilação Sul. Dessa maneira pode-se também inferir sua influencia com o regime hídrico do NEB e por consequência a influencia na produtividade da cana-de-açúcar.

Herrera e Correa (2016) afirmam que as condições dinâmicas e a variação térmica das anomalias da temperatura superficial do mar têm influência sobre a posição e intensidade da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), a qual é responsável por alterações significativas na intensidade e frequência das chuvas.

5.6 Validação e Diagnóstico para atraso de 3 meses.

A validação das análises de correlação canônica foi feita através de análise de estabilidade do conjunto de variáveis independentes. Na Tabela 9 pode-se observar o resultado da análise de sensibilidade, na qual as cargas canônicas são examinadas quanto à estabilidade quando variáveis individuais independentes são eliminadas da análise.

Tabela 9. Análise de sensibilidade dos resultados de correlação canônica consequentes da remoção de uma variável independente.

Variável	Resultado após eliminação de		
	MtsmAN	MedWC	MEN3

completa				
Correlação canônica (R)	0,82	0,82	0,81	0,79
Raiz canônica (R ²)	0,67	0,67	0,65	0,63
VARIÁVEL ESTATÍSTICA DEPENDENTE				
GruPro1	0,67	0,68	0,65	0,73
GruPro2	0,95	0,95	0,91	0,91
GruPro3	0,89	0,88	0,92	0,87
Variância compartilhada	0,66	0,66	0,63	0,67
Redundância	0,47	0,47	0,46	0,44
VARIÁVEL ESTATÍSTICA INDEPENDENTE				
Cargas Canônicas				
MtsmAS	0,43	0,43	0,46	0,46
MtsmAN	0,30	-	0,29	0,30
Mdarwin	0,04	0,04	0,06	0,06
Mtahiti	0,22	0,22	0,24	0,23
MEN12	-0,09	-0,08	-0,06	-0,05
MEN3	0,10	0,10	0,11	-
MedWC	0,18	-0,18	-	0,16
MedWE	-0,07	-0,08	-0,09	-0,13
MedWW	0,06	0,06	0,05	0,08
Variância compartilhada	0,02	0,02	0,01	0,02
Redundância	0,03	0,02	0,03	0,03

Verificou-se que as cargas canônicas são estáveis e consistentes nos três casos onde houve a retirada de uma variável independente (MtsmAN, MedWC e MEN3). A maior alteração se deu na correlação canônica (R) com a retirada da variável MEN3, mas uma pequena mudança de 3 centésimos e na carga canônica do GruPro1 com diferença de 6 centésimos para o valor original com todas variáveis, conforme descrito por Moura (2018), um pesquisador que examinasse os pesos canônicos, encontraria resultados bastante variados, dependendo de qual variável fosse eliminada. Reforçando que o procedimento mais adequado é usar a carga canônica e a carga cruzada para fins de interpretação da estabilidade dos resultados.

6. CONCLUSÕES

Foi possível selecionar as melhores variáveis preditoras através de análise de correlação canônica das características climáticas para elaboração de modelos de previsão de produtividade da cana-de-açúcar, com antecedência de até três meses.

Constata-se ausência de pesquisas no Nordeste para previsões de produtividade com antecedência de até três meses com preditores baseados nos oceanos Pacífico e Atlântico.

A análise hierárquica de agrupamento, representada pelo dendrograma, produziu três grupos homogêneos de produtividade da cana-de-açúcar.

A análise de correlação canônica apresentou melhores resultados para as áreas de menor produtividade, áreas com menor manejo e com resultados de produção mais fortemente influenciada pelo clima.

A análise de correlação canônica identificou que os melhores preditores estudados são TSM no Atlântico Sul e Atlântico Norte, pressão atmosférica em Tahiti, os campos de ventos no Pacífico central e os campos de TSM nas áreas do El Niño 3.

Essas variáveis climatológicas tem contribuição relevante no rendimento agrícola da cana-de-açúcar. Incorporar a ACC em estudos de modelos preditores podem maximizar a escolha de variáveis independentes que a princípio não demonstrem correlações significativas ou onde as variáveis independentes apresentem autocorrelação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEL, Benjamin D.; RAJAGOPALAN, Balaji; RAY, Andrea J. A predictive model for seasonal pond counts in the United States Prairie Pothole Region using large-scale climate connections. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 4, p. 044019, 2020.
- AFIFI, Abdelmonem; CLARK, Virginia A. Computer-aided multivariate analysis. Third ed. **Chapman and hall**, new York, 505 p. 1996.
- ALLEN JR, L. H.; JONES, P.; JONES, J. W. Rising atmospheric CO₂ evapotranspiration. In: **National conference on advances in evapotranspiration, Hyatt Regency Chicago, Ill.(USA), 16-17 Dec 1985**. American Society of Agricultural Engineers, 1985.
- ALVES, J. M. B.; REPELLI, C. A.; MELLO, N. G. A pré-estação chuvosa do setor norte do Nordeste Brasileiro e sua relação com a temperatura dos oceanos adjacentes. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 8, n. 1, p. 22-30, 1993.
- ANDREOLI, Rita Valéria et al. The influence of different El Niño types on the South American rainfall. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 3, p. 1374-1390, 2017.
- ARAGÃO, J.O.R. **A general circulation model investigation of the atmospheric response to El Niño**. National Center for Atmospheric Research, 1986. 144p. (NCAR Cooperative Thesis, 100).
- ARAGHI, A., MAGHREBI, M. & OLESEN, JE. Efeito da variação da velocidade do vento na produção de trigo de sequeiro avaliada pelo modelo. **CERES-Wheat. Int J Biometeorol** **66** , 225–233, <https://doi-org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s00484-021-02209-7>. (2022).
- ARAÚJO, Rosimeire Gonzalez et al. A influência do evento El Niño-Oscilação Sul e Atlântico Equatorial na precipitação sobre as regiões norte e nordeste da América do Sul. **Acta Amazonica**, v. 43, p. 469-480, 2013.
- ASSENS, Senthold et al. Rising temperatures reduce global wheat production. **Nature climate change**, v. 5, n. 2, p. 143-147, 2015. <https://doi.org/10.1038/nclimate2470>. 2015.
- BARBIERI, Diogo Mazza. Formas do relevo e variabilidade espacial de atributos químicos e mineralógicos de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar. 2007.
- BARNETT, T. P.; PREISENDORFER, R. Origins and levels of monthly and seasonal forecast skill for United States surface air temperatures determined by canonical correlation analysis. **Monthly Weather Review**, v. 115, n. 9, p. 1825-1850, 1987. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<1825:OALOMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<1825:OALOMA>2.0.CO;2).
- BRAHMANANDA RAO, V.; DE LIMA, Marley C.; FRANCHITO, S. H. Seasonal and interannual variations of rainfall over eastern northeast Brazil. **Journal of climate**, v. 6, n. 9, p. 1754-1763, 1993.
- CÂMARA, G.M.S Ecofisiologia da cultura da cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G.M.S **Produção da cana-de-açúcar**. ESALQ: Piracicaba, p. 31-64, 1993.
- CAPOTONDI, Antonietta et al. Understanding ENSO diversity. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 96, n. 6, p. 921-938, 2015.

CAPUTO, M. M. et al. Acumulación de sacarosa, productividad y floración de cana de azúcar bajo el uso de reguladores vegetales; sugarcane sucrose accumulation, productivity and flowering using plant regulators. **Interciencia**, v. 32, p. 834-840, 2007.

CHAVES JUNIOR, G. T. Influência do clima na produtividade da cana-de-açúcar. **Araçatuba, SP: Fatec**, 2011.

CONAB. ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA DE CANA-DE-AÇÚCAR. v. 9 - **Safra 2022/23, n.3 - Terceiro levantamento**, dez de 2022, p. 16-59.

CUNHA, Márcio Vieira da et al. Associação entre características morfológicas e produtivas na seleção de clones de capim-elefante. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, p. 482-488, 2011. <https://doi-org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1590/S1516-35982011000300004>.

DANTAS NETO, José et al. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia agrícola e ambiental**, v. 10, p. 283-288, 2006..

DANTAS NETO, J. ; TEODORO, I.; FARIAS, C. H. A. Sistema produtivo da cana-de-açúcar. In: Curso de especialização em gestão na indústria sucroalcooleira. **UFCG, Modulo III, Cap.1**, p.1-7. 2010.

DA SILVA, Thieres GF et al. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 64-71, 2012. Gale Academic OneFile, link.gale.com/apps/doc/A288689110/AONE?u=capes&sid=AONE&xid=9ef2bb41.

DIAZ, Alvaro F.; STUDZINSKI, Caarem D.; MECHOSO, Carlos R. Relationships between precipitation anomalies in Uruguay and southern Brazil and sea surface temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. **Journal of Climate**, v. 11, n. 2, p. 251-271, 1998.

DIOLA, V.; SANTOS, F. Fisiologia. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e álcool - tecnologias e perspectivas. Viçosa, MG: **Editora UFV**, 2010. p. 25-49.

ENFIELD, David B.; MAYER, Dennis A. Tropical Atlantic sea surface temperature variability and its relation to El Niño-Southern Oscillation. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 102, n. C1, p. 929-945, 1997.

FAO, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Food Outlook: biannual report on global food markets**. Rome/ Italy, FAO, 2019.

FAO, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Food Outlook: biannual report on global food markets**. Rome/ Italy, FAO, 2020.

FISCHER, Graciela Redies; DINIZ, Gilberto Barbosa; MARQUES, Julio Renato Quevedo. Previsão do número de dias de chuva para a metade sul do Rio Grande do Sul utilizando a temperatura da superfície do mar (TSM). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, p. 146-151, 2008.

GAVA, Glauber J. de C. et al. Productivity of three sugarcane cultivars under dry and drip irrigated management. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 250-255, 2011. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662011000300005&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 06 Fev. 2021. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662011000300005>.

- GLERIANI, José Marinaldo. **Redes neurais artificiais para classificação espectro-temporal de culturas agrícolas**. 2004. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto)–Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 211p. 2005.
- GRIMM, Alice M.; TEDESCHI, Renata G. ENSO and extreme rainfall events in South America. **Journal of Climate**, v. 22, n. 7, p. 1589-1609, 2009.
- HAIR, J.F; ANDERSON, R.E; TATHAM, R.L; BLACK, W.C. Multivariate data analysis. 5 ed. **Englewood Cliffs: Prentice- Hall**, 1998. 730p.
- HAIR JUNIOR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. Análise multivariada de dados. Porto Alegre: Bookman, 2005. 593 p.
- HASTENRATH, Stefan; WU, Ming-Chin; CHU, Pao-Shin. Towards the monitoring and prediction of north-east Brazil droughts. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 110, n. 464, p. 411-425, 1984.
- HERRERA, M. C. P.; CORREA, C. A. P. An assessment of El Niño and La Niña impacts focused on monthly and seasonal rainfall and extreme dry/precipitation events in mountain regions of Colombia and México. **Advances in Geosciences**, v. 42,p. 23-33, 2016.
- HOUNSOU-GBO, Gbèkpo Aubains et al. Tropical Atlantic contributions to strong rainfall variability along the Northeast Brazilian coast. **Advances in meteorology**, v. 2015, 2015., Article ID 902084, 13 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2015/902084>.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). *Censo Agropecuário: Resultados definitivos 2017*. ISSN: 01036157. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612>> Acesso em: 03 Fev. 2021.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil), Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-areas-dos-municipios.html?=&t=sobre>> Acesso em: 20 Mar. 2021
- INMAN-BAMBER, N.G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops research**. Australia, v. 89, p. 107-122, 2004.
- INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, David M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field crops research**, v. 92, n. 2-3, p. 185-202, 2005.
- JADOSKI, Cleber Junior et al. Fisiologia do desenvolvimento do estágio vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). Revista **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, v. 3, n. 2, p. 169-176, 2010.
- KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V.; SOUZA, R. A. F. Evolving anomalous SST patterns leading to ENSO extremes: relations between the tropical Pacific and Atlantic Oceans and the influence on the South American rainfall. **International Journal of Climatology**, v. 31, p.1119-1134, 2011.
- LANDMAN, Willem A.; MASON, Simon J. Forecasts of near-global sea surface temperatures using canonical correlation analysis. **Journal of Climate**, v. 14, n. 18, p. 3819-3833, 2001.

- LATIF, Mojib; GRÖTZNER, A. The equatorial Atlantic oscillation and its response to ENSO. **Climate Dynamics**, v. 16, p. 213-218, 2000.
- LEITÃO, M. DE M. V. B. R. **Balanco de Radiação em três Ecossistemas da Floresta Amazônica: Campina, Campinarana e Mata Densa**. Tese de Doutorado em Meteorologia, aprovada em 07 de outubro de 1994 (INPE/MCT).
- L'HEUREUX, Michelle L.; TIPPETT, Michael K.; BARNSTON, Anthony G. Characterizing ENSO coupled variability and its impact on North American seasonal precipitation and temperature. **Journal of Climate**, v. 28, n. 10, p. 4231-4245, 2015. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00508.1>. 2015.
- MAGALHÃES, A. C. N. Análise quantitativa do crescimento. **Fisiologia vegetal**, v. 1, n. 2, p. 333-350, 1979. In: FERRI, M. G. Fisiologia Vegetal. 2. ed. São Paulo: Editoras EPU; EDUSP, v. 1, p. 331-350, 1985.
- MAGRO, Fábio J. et al. Biometria em cana-de-açúcar. **Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz: Butanta, Brazil**, 2011.
- MALAVOLTA, E., HAAG, H. P. Fisiologia. In: MALAVOLTA, E., SEGALA, A.L, GOMES, F.P., et al. Cultivo e adubação da cana-de-açúcar. Campinas: **Instituto Brasileiro de Potassa**. cap. 8, p. 221-236, 1964.
- MARCUSI, Aline et al. Utilização de índices de vegetação para os sistemas de informação geográfica-Use of index vegetation for the geographic information system. **Caminhos de geografia**, v. 11, n. 35, 2010.
- MARGARIDO, F. B. Planejamento agrícola em cana-de-açúcar. **Atualização em produção de cana-de-açúcar. Livrocere, Piracicaba**, p. 69-78, 2006.
- MARIN, Fabio; NASSIF, Daniel SP. Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: Fisiologia, conjuntura e cenário futuro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 232-239, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662013000200015&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 03 fev. 2021. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000200015>.
- MARKHAM, Charles G.; MCLAIN, Douglas R. Sea surface temperature related to rain in Ceará, north-eastern Brazil. **Nature**, v. 265, n. 5592, p. 320-323, 1977.
- MINGOTI, Sueli Aparecida. Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada. Belo Horizonte: **Ed. UFMG**, 2005. 297p.
- MOLION, Luiz Carlos Baldicero. Aquecimento global, El Niños, manchas solares, vulcões e Oscilação Decadal do Pacífico. **Revista Climanalise**, v. 3, n. 1, p. 1-5, 2005.
- MONTANS NETO, L. H. M. Censo varietal quantitativo das variedades de cana-de-açúcar cultivadas no Estado de São Paulo em 2007. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 16, 2008, São Carlos. **Anais de Eventos da UFSCar**. São Carlos: UFSCar, v. 4, p. 393, 2008.
- MOURA, Antonio D.; SHUKLA, Jagadish. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **Journal of the atmospheric sciences**, v. 38, n. 12, p. 2653-2675, 1981.
- MOURA, Geber Barbosa de Albuquerque. **Identificação de Preditores Para as Chuvas do Setor Leste do Nordeste do Brasil Utilizando Análise de Correlação**

- Canônica**. 2018. 98p. Tese (Professor Titular. Área de concentração: Agrometeorologia) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. 2018.
- MAZAMBANI, A. E. et al. História e morfologia da cana-de-açúcar. **SEGATO, SV; PINTO, AS; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, JCM Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba: CP**, v. 2, p. 11-18, 2006.
- MAZOUZ, Rabah; ASSANI, Ali A.; RODRÍGUEZ, Marco A. Application of redundancy analysis to hydroclimatology: A case study of spring heavy floods in southern Québec (Canada). **Journal of Hydrology**, v. 496, p. 187-194, 2013.
- NÓBREGA, José Nildo da et al. Eventos extremos de precipitação nas mesorregiões da Paraíba e suas relações com a TSM dos oceanos tropicais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, p. 197-208, 2014.
- NOBRE, D. A. C., SILVA, F. C. DOS S., GUIMARÃES, J. F. R., RESENDE, J. C. F. DE, & MACEDO, W. R. . Análise de Trilha e Correlação Canônica nos Componentes do Desempenho de Girassol. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, 4(3), 0364–0369. <https://doi.org/10.18540/jcecvl4iss3pp0364-0369>. 2018.
- NOBRE, P.; NOBRE, C. A.; MOURA, A. D. Large scale circulation anomalies and prediction of northeast Brazil droughts. 1985.
- NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of sea surface temperature, wind stress and rainfall over the tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, v.9, p.2464-2479, 1996.
- NTALE, Henry K.; GAN, Thian Yew; MWALE, Davison. Prediction of East African seasonal rainfall using simplex canonical correlation analysis. **Journal of Climate**, v. 16, n. 12, p. 2105-2112, 2003.
- PROTÁSIO, Thiago de Paula et al. Correlações canônicas entre as características químicas e energéticas de resíduos lignocelulósicos. **Cerne**, v. 18, p. 433-439, 2012.
- OLIVEIRA, José Roberto Temponi de; PADOVANI, Carlos Roberto. Análise da Inter-relação da Produtividade Agrícola e Característica Climática na Região Sudeste do Estado de Mato Grosso, por Técnicas Multivariadas. **E&S Engineering and Science**, v. 6, n. 2, p. 2-12, 2017. <https://doi.org/10.18607/ES201764688>. 2017.
- OLIVEIRA, Nayhara de Lima; MARCUZZO, Francisco Fernando Noronha. Correlação da temperatura na parte sul do oceano Atlântico com o NDC* em Mato Grosso. **GEOgraphia** (Universidade Federal Fluminense. Pós-Graduação Em Geografia), 18(36), 183-206. 2016.
- RANA, Sapna et al. Seasonal prediction of winter precipitation anomalies over Central Southwest Asia: A canonical correlation analysis approach. **Journal of Climate**, v. 31, n. 2, p. 727-741, 2018. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0131.1>. 2018.
- REPELLI, Carlos Alberto; NOBRE, Paulo. Statistical prediction of sea-surface temperature over the tropical Atlantic. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 24, n. 1, p. 45-55, 2004.
- RIDESA, Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético. 45 anos de variedades RB de cana-de-açúcar: 25 anos de Ridesa, **1 ed. Curitiba: Graciosa**, 2015. ISBN: 978-85-66456-08-0.
- RODRIGUES, João Domingos. Fisiologia da cana-de-açúcar. **Botucatu: Unesp**, p. 419-449, 1995.

- RODRÍGUES-FONSECA, B.; Polo, I.; GARCIA-SERRANO, J.; LOSADA, T.; MOHINO, E.; MECHOSO, C.R.; KUCHARSKI, F. Are Atlantic Niños enhancing Pacific ENSO events in recent decades? **Geophysical Research Letters**, 36, 2009.
- ROSSI, Drieli Aparecida et al. Canonical correlations in elephant grass for energy purposes. **African Journal of Biotechnology**, v. 13, n. 36, 2014.
- SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In SEGATO, Silvelena V. et al. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**, v. 1, p. 19-36, 2006.
- SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba, SP: ND-LIVROCERES, 2006.
- SERVAIN, Jacques; SEVA, M. A. R. C. On relationship between tropical Atlantic sea surface temperature, wind stress and regional precipitation indices: 1964-1984. **Ocean Air Interaction**, v. 1, p. 183-190, 1987.
- SILVA, Madson Tavares et al. Estudo da Temperatura da Superfície do Mar para os Oceanos Atlântico e Pacífico Utilizando a Técnica de Análises de Componente Principal e de Agrupamento (Study of Sea Surface Temperature for the Atlantic and Pacific Oceans Using the Technique of...). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 2, p. 264-277, 2011.
- SILVA, C. M. E.; LIMA, G. W.; MEZZOMO, H. C.; SIGNORINI, V. S.; OLIVEIRA, A. B. DE; NARDINO, M. Canonical correlations between high and low heritability wheat traits via mixed models. Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brazil. **Ciência Rural**, 2023 Vol.53 No.2 ref.32. <http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210798.2023>.
- SINGH, Amandeep et al. Phytochemical profile of sugarcane and its potential health aspects. **Pharmacognosy reviews**, v. 9, n. 17, p. 45, 2015. Gale Academic One File, link.gale.com/apps/doc/A412969634/AONE?u=capes&sid=AONE&xid=14723236. Acesso em: 03 fev. 2021. Número do documento Gale: GALE A412969634.
- SORDI, R. A.; BRAGA JUNIOR, R. L. C. Florescimento, isoporização e peso médio dos colmos de novos clones e variedades de cana-de-açúcar no decorrer da safra. **Anais Seminário Copersucar de Tecnologia Agrônômica**, v. 6, p. 137-149, 1994.
- S.O.S MATA ATLÂNTICA; INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS -INPE. Atlas dos remanescentes florestais da mata atlântica período 2020-2021. Relatório Técnico. São Paulo: Fundação S.O.S Mata Atlântica, 2022. Disponível em: <<https://www.sosma.org.br/sobre/relatorios-e-balancos/>>. Acesso em: 02 mar. 2023.
- SOUZA, PM de. **Modernização e mudanças estruturais na agricultura brasileira, 1970 a 1995. 2000. 287p.** 2000. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado)–Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- STOCKDALE, Timothy N. et al. Understanding and predicting seasonal-to-interannual climate variability-the producer perspective. **Procedia Environmental Sciences**, v. 1, p. 55-80, 2010.
- SUGUITANI, Carlos. **Entendendo o crescimento e produção da cana de açúcar: avaliação do modelo Mosicas.** 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- SUZUKAWA, Akio; TANEICHI, Nobuhiro. Redundancy Index in Canonical Correlation Analysis with Linear Constraints. In: **Measurement and Multivariate**

Analysis. Springer Japan, 2002. p. 125-132.. https://doi-org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1007/978-4-431-65955-6_13

TASCHETTO, Andrea S. et al. How sensitive are the Pacific–tropical North Atlantic teleconnections to the position and intensity of El Niño-related warming?. **Climate Dynamics**, v. 46, p. 1841-1860, 2016.

TEODORO, Iêdo Teodoro et al. Isoquantas de Produtividade da Cana-de-açúcar em Função de Níveis de Irrigação e Adubação Nitrogenada. **Irriga**, v. 18, n. 3, p. 387-401, 2013. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2013v18n3p387>

TEJERA, Noel A. et al. Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars. **Field Crops Research**, v. 102, n. 1, p. 64-72, 2007.

TRUGILHO, Paulo Fernando; LIMA, José Tarcisio; MORI, Fábio Akira. Correlação canônica das características químicas e físicas da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. **Revista Cerne**, v.9, p.66-80, 2003.

WARD JR, Joe H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **Journal of the American statistical association**, v. 58, n. 301, p. 236-244, 1963. <http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>

WIEDENFELD, Bob. Scheduling water application on drip irrigated sugarcane. **Agricultural Water Management**, v. 64, n. 2, p. 169-181, 2004.