UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Presidente Prudente

KARLA LETÍCIA SEVIERO RAMPAZZI

DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA ASSOCIADA À PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR, NO OESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO – BRASIL

Presidente Prudente
2021

KARLA LETÍCIA SEVIERO RAMPAZZI

DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA ASSOCIADA À PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR, NO OESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO – BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Geografia, junto ao Conselho de Curso de Graduação em Geografia, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista "Júlio Mesquita Filho", Câmpus de Presidente Prudente.

Orientador: Prof. Dr. Edilson Ferreira Flores

Presidente Prudente
2021

R177d

Rampazzi, Karla Letícia Seviero

Distribuição espaço-temporal da precipitação pluviométrica associada à produtividade da cana-de-açúcar, no oeste do estado de São Paulo – Brasil / Karla Letícia Seviero Rampazzi. -- Presidente Prudente, 2021

83 f. : tabs., mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Geografia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente

Orientador: Edilson Ferreira Flores

1. Precipitação pluviométrica. 2. Geoestatística. 3. Geoprocessamento. 4. Anos padrão. 5. Cana-de-açúcar. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

KARLA LETÍCIA SEVIERO RAMPAZZI

DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA ASSOCIADA À PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR, NO OESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO – BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Geografia, junto ao Conselho de Curso de Graduação em Geografia, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista "Júlio Mesquita Filho", Câmpus de Presidente Prudente.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Edilson Ferreira Flores
UNESP – Câmpus de Presidente Prudente
Orientador

Profª. Drª. Isabel Cristina Moroz Caccia Gouveia
UNESP – Câmpus de Presidente Prudente

Prof. Dr. José Tadeu Garcia Tommaselli
UNESP – Câmpus de Presidente Prudente

Presidente Prudente
26 de fevereiro de 2021

Dedico:

Aos meus pais Carlos e Sueli,

à minha irmã Karina,

e ao meu namorado Luiz Fernando.

AGRADECIMENTOS

Foram cinco anos até chegar aqui, em alguns momentos cogitei em desistir, mas tive pessoas que me deram todo o apoio necessário e que contribuíram para eu persistir, e por esse motivo tenho que lhes agradecer.

Agradeço a Deus, pela vida, pela saúde, por todas as conquistas e pelas pessoas maravilhosas que estão ao meu entorno.

Agradeço aos meus pais, Carlos e Sueli, que não mediram esforços para minha formação, vocês dois são minha inspiração, meu porto seguro, eu os amo infinitamente.

Agradeço também à minha irmã que mesmo estando sempre ocupadíssima auxiliava-me quando eu a recorria, assim como ela mesma diz: “nós nos amamos na mesma proporção em que brigamos.”

À minha vovó Aurélia que rezava e reza todos os dias por cada obstáculo meu, eu te amo muito.

Ao meu namorado Luiz Fernando por todo companheirismo, toda paciência, todas as palavras de amor e amparo, eu amo você meu amor!

À minha amiga Allana que mesmo distante, fez a diferença, você é luz!

Agradeço também às minhas amigas Beatriz, Bruna e Thaís, pela amizade verdadeira, pelos conselhos, pelas risadas, pelos trabalhos... Se não fosse vocês acredito que eu não teria conseguido.

Meus sinceros agradecimentos ao Prof. Edilson Ferreira Flores, que me deu todo apoio e suporte desde o primeiro ano do curso, e que se tornou uma inspiração para mim, o meu muito obrigado!

À todos os professores e funcionários da FCT-UNESP que de alguma forma contribuíram na minha formação acadêmica.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo financiamento da pesquisa no período de 01/11/2018 a 30/11/2020, processo número 2018/11829-0.

“Faça o teu melhor, na condição que você tem,

enquanto você não tem condições melhores,

para fazer melhor ainda.”

(CORTELLA, 2018)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise da distribuição da precipitação pluviométrica no oeste do estado de São Paulo, bem como da produtividade da cana-de-açúcar. Para tanto, objetivando a obtenção de melhores resultados foram empregadas técnicas de geoestatística associadas à tecnologia do geoprocessamento. Quando aliadas e manipuladas adequadamente, essa integração fornece diversas possibilidades de análise espacial. Desse modo, para identificar os anos representativos de 2007 a 2017, utilizou-se da Análise de Agrupamento apoiada ao método hierárquico de Ward, logo, os anos padrão aqui evidenciados foram: 2013 (habitual), 2014 (seco) e 2015 (chuvoso). Mediante a modelagem semivariográfica foram aplicadas técnicas de estimação e simulação, esses procedimentos permitiram a visualização e a identificação da distribuição espaço-temporal das precipitações pluviométricas nesta porção do estado. Assim, foi possível confirmar que a ocorrência do período chuvoso deu-se de outubro a março, e o mais seco compreendeu aos meses de abril a setembro, no primeiro período as áreas mais úmidas concentraram-se ao norte e no período seco mais ao sul. Em síntese, as análises obtidas evidenciam que, mesmo que haja inúmeros fatores que influem na produtividade da cana-de-açúcar, as variações pluviométricas apresentam-se ainda como fator preponderante.

Palavras-chave: Precipitação pluviométrica. Geoestatística. Geoprocessamento. Anos padrão. Cana-de-açúcar.

ABSTRACT

This work presents an analysis of the distribution of rainfall in the west of the state of São Paulo, as well as of the productivity of sugarcane. For this purpose, in order to obtain the best results, geostatistics techniques associated with geoprocessing technology were to apply. When allied and manipulated properly, this integration provides diverse possibilities of spatial analysis. Thus, in order to identify the representative years from 2007 to 2017, we used the Cluster Analysis supported by Ward's hierarchical method, thus the standard years shown here were: 2013 (usual), 2014 (dry) and 2015 (rainy). Estimation an simulation techniques were applied though semivariographic modeling, which allowed the visualization and identification of the spatiotemporal distribution of rainfall in this portion of the state. Thus, it was possible to confirm that the occurrence of the rainy period occurred from October to March, and the driest comprised the months from April to September; the most humid areas were concentrated to the north during the rainy period and further south during the driest period. The analyzes obtained show that, even though there are numerous factors that influence sugarcane productivity, rainfall variations are still a major factor.

Keywords: Rainfall. Geostatistics. Geoprocessing. Standard years. Sugarcane

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do oeste do estado de São Paulo.....17
Figura 2 - a) Os centros de ação da América do Sul; b) As massas de ar na América do Sul 20
Figura 3 - Classificação das feições climáticas no território paulista 24
Figura 4 - Unidades Pluviais do estado de São Paulo 25
Figura 5 - Ciclo da cana-de-açúcar em função da época de plantio.....26
Figura 6 - Estádios fenológicos da cana planta e da cana soca 28
Figura 7 - a) Amostragem aleatória simples; b) Amostragem aleatória estratificada; c) Amostragem sistemática.....32
Figura 8 - Processo de inferência do fenômeno espacial com base na amostragem 33
Figura 9 - Parâmetros do semivariograma.....35
Figura 10 - Parâmetros para o cálculo do semivariograma a partir de amostras irregularmente espaçadas 36
Figura 11- Representação gráfica de modelos transitivos.....37
Figura 12 - Convenções direcionais utilizadas na geoestatística.....39
Figura 13 - Representação gráfica de semivariogramas isotrópicos 39
Figura 14 - Representação gráfica de anisotropia combinada.....40
Figura 15 - Exemplos de caminhos aleatórios para uma malha regular de 5 x 5 44
Figura 16 - Demonstrativo dos dados brutos de precipitação pluviométrica no Excel 47
Figura 17 - Demonstrativo dos dados brutos da cana-de-açúcar no Excel.....48
Figura 18 - Demonstrativo dos dados de precipitação pluviométrica no Minitab 16 para a aplicação da Análise de Agrupamento 49
Figura 19 - Blocos tridimensionais da estimação por Krigagem Ordinária e da Simulação Gaussiana Sequencial (X, Y e Z).....50
Figura 20 - Dendograma.....52
Figura 21 - Síntese do dendograma 53
Figura 22 - Semivariogramas omnidirecionais da precipitação pluviométrica mensal de 2013, 2014 e 2015 55
Figura 23 - Semivariogramas omnidirecionais da precipitação pluviométrica sazonal de 2015 (ano padrão chuvoso).....56
Figura 24 - Distribuição mensal da precipitação pluviométrica de 2013 (ano padrão habitual), no oeste do estado de São Paulo.....58

Figura 25 - Distribuição sazonal da precipitação pluviométrica de 2013 (ano padrão habitual), no oeste do estado de São Paulo 59
Figura 26 - Distribuição mensal da precipitação pluviométrica de 2014 (ano padrão seco), no oeste do estado de São Paulo 61
Figura 27 - Distribuição sazonal da precipitação pluviométrica de 2014 (ano padrão seco), no oeste do estado de São Paulo 62
Figura 28 - Distribuição mensal da precipitação pluviométrica de 2015 (ano padrão chuvoso), no oeste do estado de São Paulo 64
Figura 29 - Distribuição sazonal da precipitação pluviométrica de 2015 (ano padrão chuvoso), no oeste do estado de São Paulo 65
Figura 30 - Histogramas da distribuição mensal da precipitação pluviométrica no SGeMS 67
Figura 31 - Relação entre a produção e a área colhida da cana-de-açúcar no período de 2007 a 2017, no oeste do estado de São Paulo 69
Figura 32 - Relação entre a distribuição mensal da precipitação pluviométrica e a produtividade da cana-de-açúcar, no oeste do estado de São Paulo 70
Figura 33 - Exemplo do preenchimento de falhas, demonstrativo do posto pluviométrico de Votuporanga 79
Figura 34 - Semivariogramas omnidirecionais da precipitação pluviométrica sazonal de 2013 (ano padrão habitual) 81
Figura 35 - Semivariogramas omnidirecionais da precipitação pluviométrica sazonal de 2014 (ano padrão seco) 83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros dos semivariogramas omnidirecionais da precipitação pluviométrica mensal de 2013, 2014 e 2015 54

Tabela 2 - Parâmetros dos semivariogramas omnidirecionais da precipitação pluviométrica sazonal de 2015 (ano padrão chuvoso) 56

Tabela 3 - Localização dos postos pluviométricos 77

Tabela 4 - Parâmetros dos semivariogramas omnidirecionais da precipitação pluviométrica sazonal de 2013 (ano padrão habitual) 80

Tabela 5 - Parâmetros dos semivariogramas omnidirecionais da precipitação pluviométrica sazonal de 2014 (ano padrão seco) 82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCM	Complexo Convectivo de Mesoescala
Conab	Companhia Nacional de Abastecimento
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
ENOS	El Niño Oscilação Sul
Exp	exponencial
FDAC	Função de Distribuição Acumulada Condicional
FPA	Frente Polar Atlântica
Gau	gaussiano
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LI	Linhas de Instabilidade
KO	Krigagem Ordinária
KS	Krigagem Simples
mEa	massa Equatorial Atlântica
mEc	massa Equatorial Continental
mPa	massa Polar Atlântica
mPp	massa Polar Pacífica
mTa	massa Tropical Atlântica
mTac	massa Tropical Atlântica Continentalizada
mTc	massa Tropical Continental
mTp	massa Tropical Pacífica
PAM	Produção Agrícola Municipal
PC	massa Polar Atlântica Continentalizada
PT	massa Polar Atlântica Tropicalizada
SCM	Sistema Convectivo de Mesoescala
SIDRA	Sistema IBGE de Recuperação Automática
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SGeMS	Stanford Geostatistical Modeling Software
SGS	Simulação Gaussiana Sequencial
Sph	esférico
TSM	Temperatura da Superfície do Mar

ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCOU	Zona de Convergência de Umidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
1.1 Localização da área de estudo 16
1.2 Objetivo 18
1.2.1 Objetivos específicos 18
1.3 Estrutura da monografia 18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 20
2.1 Dinâmica atmosférica no oeste do estado de São Paulo 20
2.2 Estádios fenológicos da cana-de-açúcar 26
2.3 Geoprocessamento e Sistemas de Informação Geográfica 30
2.4 Geoestatística 31
2.4.1 Conceitos básicos 31
2.4.2 Krigagem 40
2.4.2.1 Krigagem Ordinária 40
2.4.3 Simulação estocástica 43
2.4.3.1 Simulação Gaussiana Sequencial 43
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS 46
3.1 Materiais 46
3.1.1 Dados de precipitação pluviométrica 46
3.1.2 Dados da cana-de-açúcar 47
3.2 Técnicas 48
3.2.1 Preenchimento de falhas no banco de dados de precipitação pluviométrica 48
3.2.2 Seleção dos anos representativos 49
3.2.3 Aplicação das técnicas de geoestatística e elaboração dos produtos cartográficos 49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 52
4.1 Anos representativos 52
4.2 Parâmetros e semivariogramas 53
4.3 Distribuição espaço-temporal da precipitação pluviométrica de 2013 (ano padrão habitual) 56
4.4 Distribuição espaço-temporal da precipitação pluviométrica de 2014 (ano padrão seco) 60
4.5 Distribuição espaço-temporal da precipitação pluviométrica de 2015 (ano padrão chuvoso) 63

4.6 Histogramas da Krigagem Ordinária e da Simulação Gaussiana Sequencial do SGeMS 66

4.7 Análise associativa entre a precipitação pluviométrica e a produtividade da cana-de-açúcar 68

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 71

REFERÊNCIAS 73

APÊNDICE A – Informações complementares 77

1 INTRODUÇÃO

O clima, um dos principais componentes do ambiente, senão o principal, vem sofrendo alterações em escalas locais, regionais e globais. Eventos adversos manifestam-se por meio das oscilações das variáveis meteorológicas e retratam como ele passou a ser protagonista dessas transformações. Isso é reflexo da retirada da cobertura vegetal, do fluxo de pessoas e veículos, da impermeabilização do solo, do uso de materiais construtivos que retêm muito calor, da poluição atmosférica, da interferência no ciclo hidrológico e de tantas outras atividades exercidas pelo homem na paisagem. Essas transformações modificaram toda a dinâmica natural da troca de matéria e do balanço da radiação eletromagnética e integradas aos ciclos naturais, passam a ser percebidas por meio da configuração dos elementos do clima.

A dinâmica das chuvas é uma das respostas perceptíveis que se tem acerca desses processos. Compreender as variações espaciais e temporais das precipitações pluviométricas em uma determinada porção territorial é essencial, dado que, o entendimento da distribuição desse fenômeno garante um gerenciamento mais eficiente da água, tanto na área urbana quanto na rural. Posto isso, sabe-se que, o maior setor usuário de recursos hídricos é a agricultura irrigada, e a cultura da cana-de-açúcar[1], por sua vez, é aquela que detém a maior extensão territorial irrigada do país, porém há dificuldades para identificar tal prática, principalmente pela carência de dados (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2017).

A área que abarca as maiores concentrações de cana do estado de São Paulo é o oeste, dessa forma, ele foi definido com a finalidade de investigar se as variações na produtividade da cana-de-açúcar estão intimamente relacionadas às variações pluviométricas. É indiscutível que os atores sociais produzem e reproduzem técnicas que não necessariamente dependem mais diretamente das condições atmosféricas. De fato, mas apesar dos grandes avanços tecnológicos e científicos no setor do agronegócio, as flutuações climáticas ainda são fatores decisivos para o sucesso deste tipo de empreendimento. A agricultura é a atividade econômica mais dependente das condições meteorológicas, em média 80% da variabilidade da produtividade agrícola é resultado da variabilidade climática sazonal e interanual e os outros

[1] Nome científico: *Saccharum Officinarum*.
[2] A localização dos postos pluviométricos pode ser consultada em APÊNDICE A – Informações complementares (p. 77-79).

[3] Nesse trabalho optamos em não abordar o processo de germinação das sementes da cana-de-açúcar.

20% estão ligados a questões econômicas, políticas, de infraestrutura e sociais (AGRICULTURA..., [2018?]).

O estudo se faz necessário, pois com a crescente demanda de etanol e de outros derivados, a área plantada da cana-de-açúcar aumentou, visando o mercado interno e externo, porém nos últimos anos esse aumento não foi acompanhado proporcionalmente na produção, há diversas causas, contudo as estiagens foram aquelas que mais se destacaram (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2017). Desse modo, torna-se fundamental entender os estádios fenológicos da cana para ajustar as práticas agrícolas aos períodos que mais se adequem aos seus ciclos, evitando, pois, o uso desnecessário dos sistemas de irrigação.

Para isso, foi definido um recorte temporal de 11 anos (2007 a 2017), este foi traçado em função da necessidade de se obter anos de padrão habitual, seco e chuvoso, de modo a serem representados e analisados nesta pesquisa. Para gerir a grande massa de dados e realizar o agrupamento de classes de interesse, foi empregada a Análise de Agrupamento apoiada ao método hierárquico de Ward.

Não se teve o objetivo de proceder a uma análise rítmica dos tipos de tempo, e sim, procurar demonstrar como se processa a distribuição espaço-temporal da precipitação nesta porção do território paulista em anos representativos. Apesar disso, torna-se indispensável o reconhecimento dos sistemas atmosféricos que mais influenciam na quantidade e na distribuição de chuvas no oeste do estado de São Paulo.

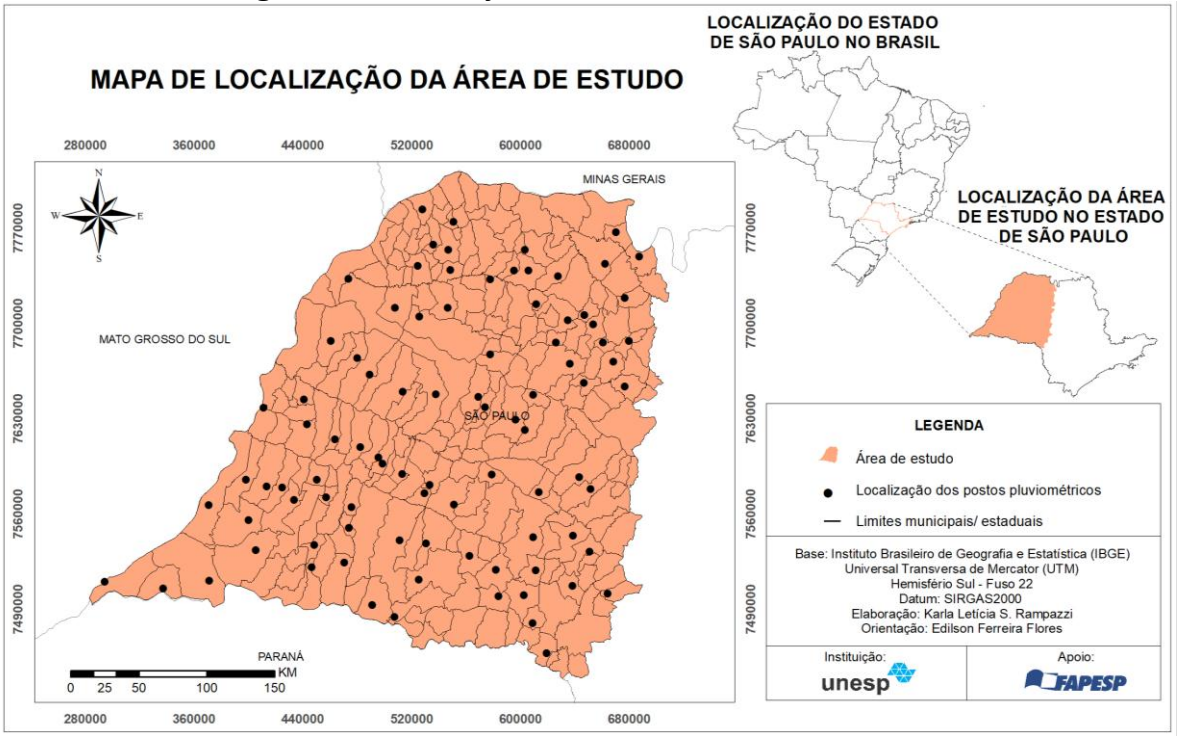
Embasados nessa discussão, neste estudo foram integradas a tecnologia do geoprocessamento à geoestatística, objetivando a obtenção de melhores resultados em relação à espacialização da precipitação pluviométrica e da produtividade da cana-de-açúcar.

1.1 Localização da área de estudo

O oeste paulista, aqui delimitado, engloba 250 municípios, no entanto, foram coletados dados de apenas 90 postos pluviométricos[2]. Ele encontra-se no Planalto Ocidental Paulista, entre os paralelos 20º e 23º sul e meridianos 49º e 53º oeste, abrangendo totalmente ou parcialmente as regiões administrativas de: Presidente Prudente, Marília, Araçatuba, São José do Rio Preto e Bauru (Figura 1).

[2] A localização dos postos pluviométricos pode ser consultada em APÊNDICE A – Informações complementares (p. 77-79).

Figura 1 - Localização do oeste do estado de São Paulo



Fonte: Elaborado pela autora.

Postos pluviométricos da região administrativa de Presidente Prudente: Adamantina, Alfredo Marcondes, Caiabu, Caiuá, Dracena, Emilianópolis, Euclides da Cunha Paulista, Flórida Paulista, Iepê, Indiana, Irapuru, Lucélia, Marabá Paulista, Mirante do Paranapanema, Monte Castelo, Narandiba, Osvaldo Cruz, Panorama, Piquerobi, Pirapozinho, Presidente Epitácio, Presidente Venceslau, Rancharia, Rosana, Santo Anastácio, Taciba e Teodoro Sampaio.

Postos pluviométricos da região administrativa de Marília: Bastos, Campos Novos Paulista, Echaporã, Gália, Garça, Iacri, Lutécia, Maracaí, Marília, Ocauçu, Ourinhos, Paraguaçu Paulista, Platina, Quatá, Queiroz, Ribeirão do Sul e Tupã.

Postos pluviométricos da região administrativa de Araçatuba: Andradina, Auriflama, Avanhandava, Barbosa, Birigui, Buritama, Coroados, Guaraçaí, Guararapes, Mirandópolis, Penapólis, Pereira Barreto, Santo Antônio do Aracanguá, Sud Mennucci, e Valparaíso.

Postos pluviométricos da região administrativa de São José do Rio Preto: Bady Bassitt, Balsamo, Cedral, Cosmorama, Dolcinópolis, Icém, Jales, José Bonifácio, Magda, Mendonça, Mirassol, Monte Aprazivel, Nipoã, Onda Verde, Oriundiúva, Palestina, Palmeira

d'Oeste, Parisi, Pontalinda, Potirenbada, Santa Albertina, Sebastianópolis do Sul, Urânia, Urupês, Valentim Gentil e Votuporanga.

Postos pluviométricos da região administrativa de Bauru: Cafelândia, Guaimbê, Guarantã, Paulistânia e Ubirajara.

1.2 Objetivo

Objetivou-se neste estudo o emprego de técnicas de geoestatística associadas à tecnologia do geoprocessamento, de modo à espacializar e analisar a distribuição da precipitação pluviométrica, bem como, da produtividade da cana-de-açúcar, no oeste do estado de São Paulo - Brasil.

1.2.1 Objetivos específicos

- Identificar no período de 2007 a 2017 anos representativos de padrão habitual, seco e chuvoso;
- Modelar os semivariogramas e analisá-los espacialmente por meio da estimação por krigagem e simulação estocástica;
- Correlacionar a precipitação pluviométrica com a produtividade da cana-de-açúcar nesta porção do estado.

1.3 Estrutura da monografia

Esse trabalho está estruturado em cinco capítulos, sendo o primeiro relativo a introdução.

O segundo capítulo foi destinado a revisão bibliográfica. Nele abordou-se a dinâmica atmosférica, os estádios fenológicos da cana-de-açúcar, o uso do geoprocessamento e na última seção destacamos alguns conceitos básicos e aplicações da geoestatística.

No terceiro capítulo comentamos sobre o desenvolvimento da pesquisa. Durante o percurso foram utilizados materiais, assim como foram empregadas técnicas. Dentre os recursos estão: softwares, bases cartográficas e base de dados, em relação às técnicas têm-se: o preenchimento de falhas, a seleção dos anos representativos, a modelagem semivariográfica e o processo de elaboração dos produtos cartográficos.

O quarto capítulo foi destinado à apresentação dos resultados e das apreciações destes. Inicialmente foram identificados os anos padrão, em seguida foram expostos os parâmetros e os semivariogramas provenientes da modelagem, num segundo momento foram analisados os painéis espaço-temporais oriundos das estimações e das simulações, posteriormente ilustrou-se alguns histogramas para estudo comparativo e, ao final, apresentamos uma análise associativa entre a precipitação pluviométrica e a produtividade da cana-de-açúcar.

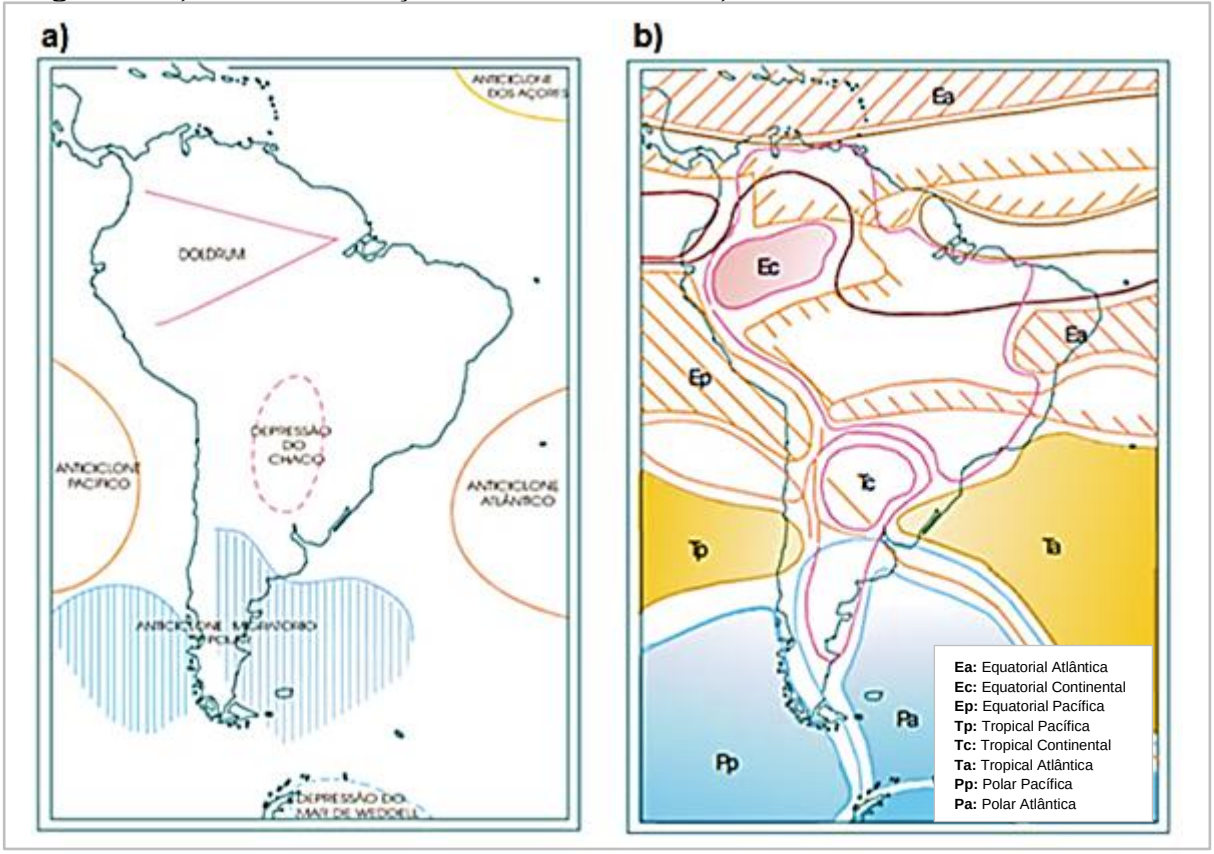
Por fim, no quinto e último capítulo, realizamos uma síntese dos resultados alcançados e recapitulamos algumas lacunas que ficaram em aberto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Dinâmica atmosférica no oeste do estado de São Paulo

Para entender como se configura a dinâmica atmosférica no oeste do estado de São Paulo, é preciso reconhecer quais os centros de ação que operam na América do Sul. Conforme Mendonça e Danni-Oliveira (2007), ela é controlada por sete deles (Figura 2), sendo cinco de alta pressão (anticiclonais) e dois de baixa pressão (depressionários), esses centros de ação dão origem aos movimentos atmosféricos e influenciam na formação das massas de ar que atuam nesta porção do continente americano (Figura 2).

Figura 2 - a) Os centros de ação da América do Sul; b) As massas de ar na América do Sul



Fonte: Modificada de Monteiro (1973).

O anticiclone dos Açores está localizado no oceano Atlântico, ele age diretamente nas orientações norte e nordeste, nele há a formação da massa Equatorial Atlântica (mEa).

No anticiclone da Amazônia ou Doldrums, ocorre a formação da massa Equatorial Continental (mEc), ela é caracterizada por provocar ventos úmidos e quentes, principalmente na estação do verão. Alguns autores denominam seu deslocamento ao centro-sul do Brasil como ondas de calor de noroeste (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

No anticiclone semifixo do Atlântico Sul, próximo ao Trópico de Capricórnio, forma-se a massa Tropical Atlântica (mTa), de aspecto quente e úmido. Ela desempenha função essencial no clima e nos tipos de tempo da porção central, nordeste, sudeste e sul do Brasil durante todo ano (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007). Ao adentrar no continente, a mTa vai perdendo suas características de origem e, em função disso, passa a ser denominada de massa Tropical Atlântica Continentalizada (mTac).

O anticiclone semifixo do Pacífico tem basicamente as mesmas características do anticiclone citado anteriormente, o que os diferencia é a pouca influência que a massa Tropical Pacífica (mTp) exerce no continente, em razão da cordilheira dos Andes, que impede a passagem do ar (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

O anticiclone migratório Polar é formado especificamente em latitudes subpolares da América do Sul, ele é denominado migratório em decorrência da sazonalidade da radiação solar que faz com que o campo de pressão atmosférica passe a se mover, no inverno ele se instala sobre latitudes mais baixas (até próximo os 30º sul) e, no verão recua para latitudes mais elevadas (próximo aos 60º sul) (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007). Nesse anticiclone há a formação de duas massas de ar, a Polar Pacífica (mPp) e a Polar Atlântica (mPa), sendo ambas frias e úmidas.

Os dois centros de ação negativos que influenciam no clima do continente, são conhecidos como depressão do Chaco e depressão dos 60º de latitude sul, ou do mar de Weddel. Segundo Mendonça e Danni-Oliveira (2007), o primeiro é um centro de baixa pressão de origem térmica, pois em função do solstício de verão ocorre o aumento da temperatura do continente em relação ao oceano, favorecendo a formação de um centro de baixa pressão na latitude da faixa de altas pressões, no verão, a região atrai para o interior do continente, ar quente e úmido, provenientes dos anticiclones semifixo do Atlântico e do centro de ação da Amazônia, no inverno a depressão do Chaco passa a atrair o anticiclone migratório Polar para o norte, nessa depressão forma-se a massa Tropical Continental (mTc), marcada por ocasionar ventos quentes e secos, resultando em dias quentes e abafados na primavera e no verão. Já a depressão dos 60º de latitude sul, ou do mar de Weddel, fica localizada na faixa subpolar, mesmo distante do continente ele tem uma inegável influência no clima da América do Sul.

Em vista disso, os sistemas atmosféricos que mais influenciam na dinâmica e nos volumes pluviométricos do oeste paulista são as: massas de ar Tropical Continental (mTc),

Tropical Atlântica (mTa), Polar Atlântica (mPa) e Equatorial Continental (mEc), além delas, há a atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Zona de Convergência de Umidade (ZCOU), Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs), Linhas de Instabilidade (LI) e os Cavados.

> Como o Oeste do estado de São Paulo encontra-se numa área de transição climática, compartilhada pelos sistemas atmosféricos inter e extratropicais, nele ocorre conflito entre as massas Tropical Atlântica e Tropical Continental, e a massa Polar Atlântica, havendo ainda participação esporádica da massa Equatorial Continental. (BOIN, 2000, p. 23).

O encontro dos sistemas polares com os sistemas tropicais passa a gerar instabilidade, logo, a Frente Polar Atlântica (FPA) resultante provoca precipitações acompanhadas de queda na temperatura. É possível então, afirmar que grande parte das chuvas no oeste paulista está predominantemente ligada às passagens destas correntes de perturbações frontais (BOIN, 2000). Após o episódio a temperatura vai subindo gradualmente, devido ao enfraquecimento da massa Polar Atlântica, em decorrência disso, ela passa a ser denominada de massa de ar Polar Tropicalizada (PT) ou Polar Continentalizada (PC).

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), é uma faixa de nebulosidade com orientação noroeste-sudeste, responsável pela geração de chuvas intensas nessa porção do território comumente no verão (CARVALHO; JONES, 2009), sua duração é de no mínimo quatro dias. A Zona de Convergência de Umidade (ZCOU), é bem semelhante a ZCAS, o que as diferencia é a duração, essa por sua vez não é superior a três dias (SACRAMENTO NETO; ESCOBAR; SILVA, 2010).

De acordo com Dias, Rozante e Machado (2009), Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs) podem ser considerados como um agrupamento de nuvens cúmulos-nimbos e, assim como as Linhas de Instabilidade correspondem a uma categoria dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs), esses que são considerados como sistemas "[...] responsáveis pela maior parte da precipitação nos trópicos e em várias localidades de latitudes médias durante a estação quente" (DIAS; ROZANTE; MACHADO, 2009, p. 181).

Cavado é um sistema que pode ser observado durante todo o ano, ele é caracterizado por ser uma área alongada de pressão atmosférica relativamente mais baixa, logo, ao ser um sistema de ação negativo ocasiona instabilidade e provoca a formação de nebulosidade e precipitação (CAVADO, [20--]).

Além dos sistemas atmosféricos, há outras fontes que influenciam na variabilidade das precipitações, é o caso do El Niño Oscilação Sul (ENOS), essa anomalia é caracterizada principalmente por alterar a Temperatura da Superfície do Mar (TSM). Ele é identificado pelo aquecimento anormal das águas superficiais do oceano Pacífico (El Niño), ou por um esfriamento anormal das águas superficiais deste mesmo oceano (La Niña). As repercussões do ENOS podem variar de intensidade entre forte, moderada e fraca de acordo com o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) (EL NIÑO..., [2016]).

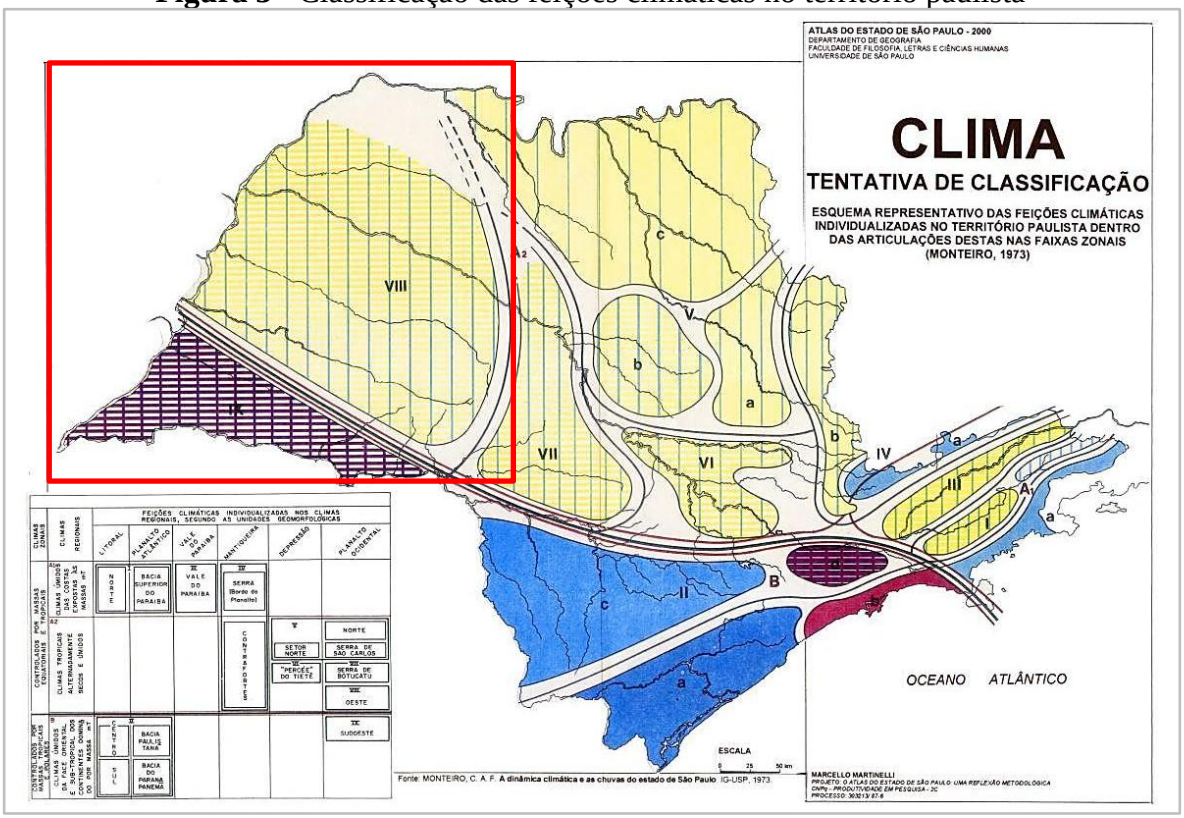
Isto posto, o oeste do estado de São Paulo é uma área caracterizada por um inverno seco e por um verão chuvoso, e a sua precipitação pluviométrica média anual varia em torno de 1200 a 1500 milímetros, geralmente esses índices são ainda mais abundantes nos espigões e em pequenas elevações e menos intensos nos fundos de vale (SANT'ANNA NETO, 1995).

A maior parte do oeste paulista apresenta altitudes que variam de 300 a 600 metros, aquelas inferiores são encontradas nos vales dos rios, assim como na foz de seus vários afluentes e, as que ultrapassam os 600 metros podem ser observadas na região de Marília (BOIN, 2000).

- Classificação climática de Monteiro (1973)

Monteiro (1973), elabora uma classificação das feições climáticas no território paulista, dentro das células regionais e das articulações destas nas faixas zonais. A área de estudo enquadra-se principalmente nas feições climáticas do Oeste (VIII) e do Sudeste (IX), conforme a Figura 3. A primeira é controlada principalmente pelas massas equatoriais e tropicais e a segunda pelas massas tropicais e polares.

Figura 3 - Classificação das feições climáticas no território paulista



Fonte: Monteiro (1973 apud MARTINELLI, 2010).

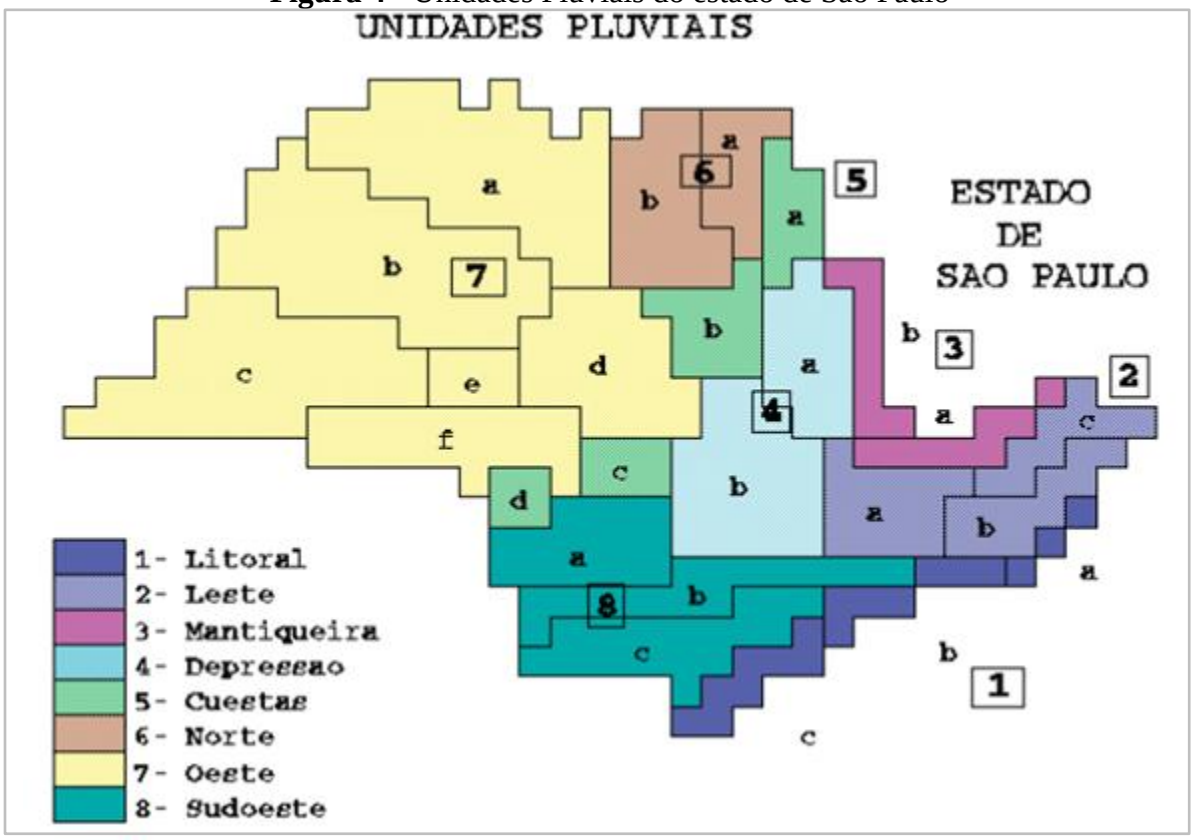
- Na feição Oeste (VIII), há participação das massas oeste-noroeste, essa corrente de aquecimento pré-frontal acaba por reduzir as chuvas de inverno. Entretanto, as precipitações de primavera e verão são mais intensas no centro norte e extremo norte. As variações dos volumes nesta feição podem ser associadas aos espigões e aos vales (MONTEIRO, 1973).
- A feição Sudeste (IX), tem bastante relação com o Oeste citado anteriormente, devido a participação das massas continentais, contudo como ela está mais ao sul do estado, a atuação das massas polares é mais intensa, o que faz com que os índices pluviométricos no inverno sejam mais abundantes.

- Unidades pluviais de Sant'Anna Neto (1995)

Fundamentado na classificação climática de Monteiro (1973), Sant'Anna Neto (1995) elabora uma carta síntese da variabilidade espacial e temporal das chuvas para o estado de São Paulo. A partir da variabilidade temporal, da distribuição espacial, sazonalidade, tendência e da ciclicidade, o autor reconheceu oito unidades pluviais no estado, e baseado nas particularidades locais classificou-as em vinte e cinco subunidades (Figura 4). Neste trabalho

será abordada apenas a unidade pluvial 7, denominada de Oeste. A dinâmica das chuvas nesta unidade se deve essencialmente pelas variações latitudinais e por fatores locais.

Figura 4 - Unidades Pluviais do estado de São Paulo



Fonte: Sant'Anna Neto (1995, p. 113).

De acordo com Sant'Anna Neto (1995), as subunidades que correspondem ao Oeste são:

- Subunidade Rio Grande/São José dos Dourados (7.a) - sofre a ação dos sistemas tropicais e equatoriais e, as chuvas anuais totalizam, em média, de 1300 a 1500 milímetros.
- Subunidade Noroeste (7.b) – essa região recebe menor quantidade de chuvas que a subunidade anterior por apresentar altitude menos elevada, seus totais anuais ficam em torno de 1100 a 1500 milímetros.
- Subunidade Alta Sorocabana (7.c) – possui as mesmas condições descritas na subunidade Noroeste, entretanto, devido a sua localização na faixa de transição dos climas controlados pelas massas tropicais e extra tropicais apresenta menor variabilidade interanual.

- Subunidade Vale Médio do Rio Tietê (7.d) – situa-se na região central do estado, onde a pluviosidade média anual é de 1300 a 1500 milímetros. Essa subunidade é marcada por grande variabilidade interanual.
- Subunidade Serra dos Agudos (7.e) – a região de Marília apresenta uma pequena cuesta, essa condição aumenta a pluviosidade na área, e as médias anuais ultrapassam os 1500 milímetros, podendo atingir índices de até 1800 milímetros.
- Subunidade Médio Vale do Rio Paranapanema (7.f) – essa área também encontra-se na faixa de transição dos climas zonais, sua pluviosidade média anual é de 1300 a 1600 milímetros.

2.2 Estádios fenológicos da cana-de-açúcar

São difundidos três sistemas de plantio da cana-de-açúcar: cana de ano, cana de ano e meio e cana de inverno (Figura 5). O sistema de ano pode ser adotado para algumas regiões, onde o plantio é preferencialmente realizado entre outubro e novembro, tendo seu amadurecimento com 12 meses. No sistema de ano e meio, o plantio é praticado de janeiro a março podendo se estender até abril, sendo esse período considerado ideal, pois apresenta boas condições em relação a temperatura e a umidade, diferentemente do cultivo anterior, essa época de plantio proporciona uma fase de repouso a planta, dessa forma, seu ciclo pode variar de 18 a 22 meses. No plantio de inverno é utilizada a torta de filtro e/ou vinhaça para auxiliar na brotação da planta, nesse sistema a cana é plantada normalmente entre os meses de maio e julho e, após 12 meses ela já se encontra em estado de maturação, em alguns casos seu ciclo pode estender-se até os 16 meses, esse sistema geralmente é mais empregado na região Nordeste do Brasil. Em função disso, é de fundamental importância reconhecer os estádios fenológicos da planta, pois ao longo do seu desenvolvimento a quantidade de água exigida pela cana pode variar.

Figura 5 - Ciclo da cana-de-açúcar em função da época de plantio

Fonte: Perfil do setor do açúcar e do etanol no Brasil (2019, p. 39).

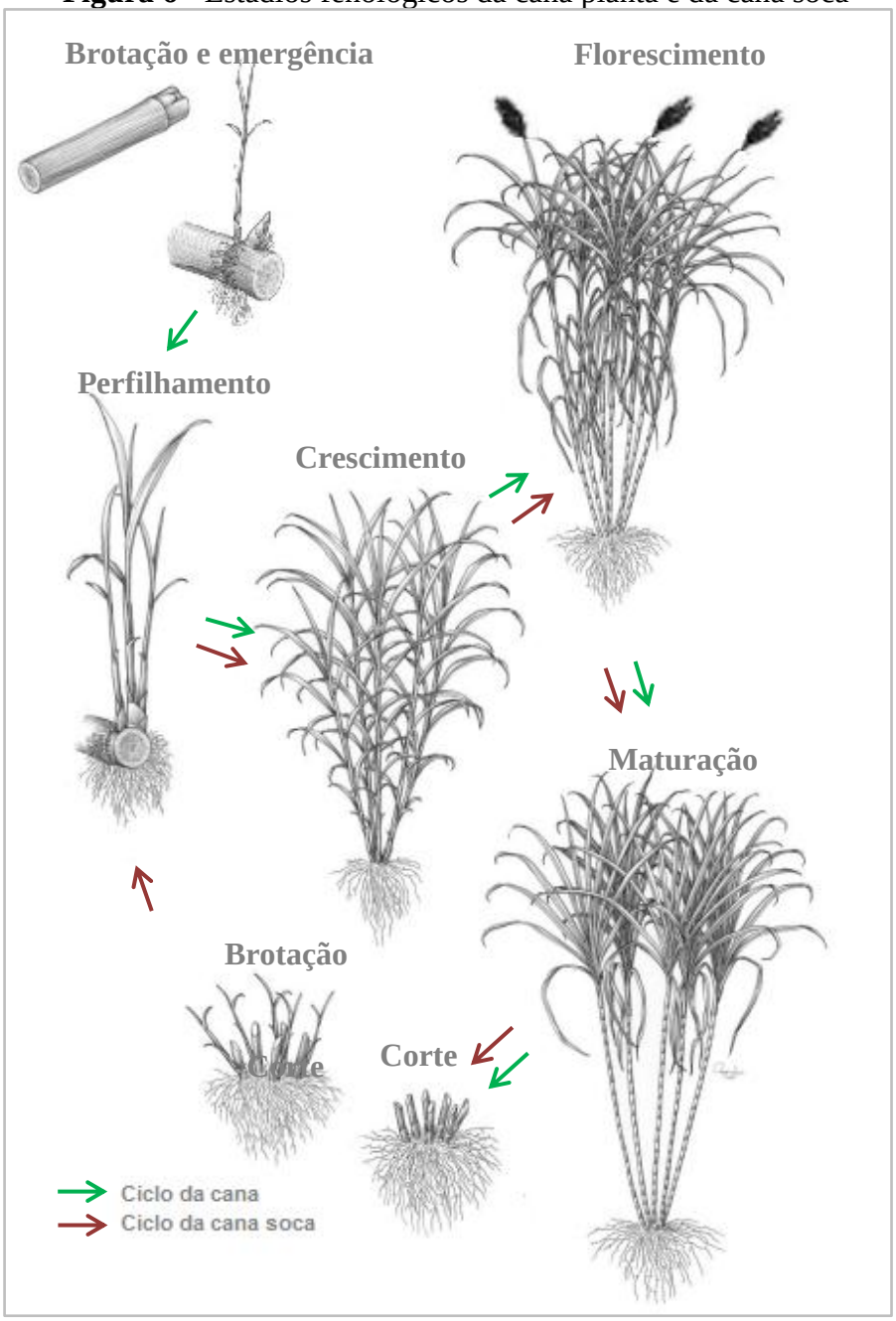
Segundo Fernandes (1984), a cana-de-açúcar consome em média 5 milímetros de água por dia, no período de estiagem consome cerca de 3 milímetros e durante as chuvas chega a 9

milímetros diários. De acordo com Silva e Silva (2012), os índices anuais de precipitação pluviométrica para a cultura devem variar entre 1500 a 2000 milímetros, porém os volumes devem ser bem distribuídos, para que ela não seja submetida a déficit hídrico e nem mesmo a saturação hídrica. Sabe-se, portanto, que a cana-de-açúcar "[...] necessita de uma época quente e chuvosa para o desenvolvimento vegetativo, e de uma época fria e/ou seca para o enriquecimento em açúcares" (FERNANDES, 1984, p. 32).

Fundamentado em Santos (1981), Marin (2014, 2020) e Thomas (2016), os estádios fenológicos da cana-de-açúcar, podem ser definidos como: germinação[3] e/ou brotação (tolete ou soqueira) e emergência, perfilhamento, crescimento, florescimento e maturação (Figura 6).

[3] Nesse trabalho optamos em não abordar o processo de germinação das sementes da cana-de-açúcar.

Figura 6 - Estádios fenológicos da cana planta e da cana soca



Fonte: Adaptada de Cheavegatti-Gianotto *et al*. (2011).

A brotação consiste no desenvolvimento dos órgãos presentes nos toletes, quando a umidade, tanto do solo quanto do ar, e a temperatura encontram-se adequadas, esse processo torna-se mais curto, de modo geral em ambientes quentes e com solos arejados. Consequentemente ocorre a emergência, momento esse marcado pelo aparecimento das folhas na superfície do solo, podendo variar de 20 a 30 dias após o plantio dos toletes (THOMAS, 2016).

O perfilhamento é caracterizado pelo desenvolvimento de novos brotos de uma mesma planta, que são denominados como perfilhos, iniciando geralmente "[...] um mês após a emergência e atingindo o ápice cerca de 2 a 4 meses após" (THOMAS, 2016, p. 63). Santos (1981), destaca que a temperatura ideal para essa fase é em torno de 30°C, necessitando de irrigação quando há ausência de precipitação pluviométrica. É esperado que o desenvolvimento dos perfilhos seja o mais abundante e uniforme possível, pois é a partir desta fase que a planta torna-se uma touceira (THOMAS, 2016). Marin (2020), enfatiza que a formação do sistema radicular da touceira é derivado do desenvolvimento das raízes de cada perfilho.

Para Marin (2014, p. 34), o "[...] crescimento é entendido em termos de alongamento, mas em seu sentido mais amplo ele também inclui aumento de massa e tamanho da planta." Nesta fase, a disponibilidade de água, nutrientes e radiação solar são essenciais, Santos (1981), afirma que a umidade do solo deve estar acima do ponto de murchamento, e a temperatura por sua vez, deve variar entre 25ºC a 32ºC, abaixo ou acima disso o crescimento é afetado. À medida que a planta se desenvolve inicia-se o acúmulo de açúcares em sua base.

O florescimento é caracterizado pela fase reprodutiva da cana-de-açúcar, esse evento fisiológico geralmente é indesejável do ponto de vista econômico, refletindo na perda de sacarose, no entanto, há recursos que inibem, assim como plantas que possuem baixa tendência ao florescimento. Esse processo é então resultado de uma interação de diversos fatores, destacando-se o "[...] fotoperíodo (de 12,5 horas e pelo menos 10 dias ininterruptos é favorável), a temperatura do ar (entre 18ºC e 32ºC induz), a umidade (a seca reduz ou inibe a ocorrência), a radiação solar e a fertilidade do solo" (THOMAS, 2016, p. 67).

A fase da maturação é a acumulação de sacarose nos colmos, a partir do processo da fotossíntese, "[...] esta fase não é bem definida fisiologicamente e tem início nos meses finais do ciclo da cultura [...]" (MARIN, 2014, p. 41), esse mesmo autor evidencia que na região Sudeste do país o processo de maturação da cana-de-açúcar ocorre naturalmente no início do mês de maio, atingindo seu clímax no mês de outubro, devido as condições climáticas existentes. Assim sendo, a maturação da cana-de-açúcar pode também ser induzida por meio da aplicação de maturadores.

Deuber[4] (1988) diferencia a maturação da cana-de-açúcar do ponto de vista botânico, fisiológico e econômico:

> Botanicamente, a cana-de-açúcar está madura após a emissão de flores e formação de sementes que possam dar origem a novas plantas. No seu ciclo, normalmente a cana-de-açúcar atinge a maturação botânica antes de atingir a fisiológica. Fisiologicamente, a maturação é alcançada quando os colmos atingem o seu potencial de máximo armazenamento de sacarose, conceito que se aproxima do critério econômico, em que se considera a cana madura, ou em condições de ser industrializada, quando esta atinge teor de sacarose acima de um valor mínimo pré-estabelecido. (DEUBER, 1988 apud MARIN, 2014, p. 41).

O momento da colheita é definido tendo em vista a variedade da planta, a época de plantio, o manejo da maturação e as condições climáticas da região (MARIN, 2020). Geralmente a colheita da cana-de-açúcar no Centro-Sul do Brasil inicia-se entre abril e maio e prolonga-se até novembro, conforme aponta Silva e Silva (2012). A longevidade de um canavial pode variar, contudo a média recorrente de cortes é seis. Thomas (2016), descreve como ocorre o rebrote da cana soca para iniciar um novo ciclo, esse que durará em média 12 meses:

> O rebrote da cana-de-açúcar ocorre quando o fator ambiental limitante (frio e/ou seca) que induz a maturação é superado. As fases de desenvolvimento na cana soca são as mesmas da cana planta, porém a velocidade de desenvolvimento da lavoura da brotação emergência até o fechameto do dossel é mais rápida, porque já existe um sistema radicular estabelecido. (THOMAS, 2016, p. 72).

2.3 Geoprocessamento e Sistemas de Informação Geográfica

Para Câmara e Davis (2001, p. 1) "[...] o termo geoprocessamento denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica [...]". Já Rodrigues (1990), considera o geoprocessamento como um termo amplo, que se refere a um conjunto de tecnologias que são utilizadas para manipular informações espaciais e de desenvolvimento.

> Num país de dimensão continental como o Brasil, com uma grande carência de informações adequadas para a tomada de decisões sobre os problemas urbanos, rurais e ambientais, o Geoprocessamento apresenta um enorme potencial, principalmente se baseado em tecnologias de custo relativamente baixo, em que o conhecimento seja adquirido localmente. (CÂMARA, DAVIS, 2001, p. 1).

Dessa forma, entende-se que o geoprocessamento é uma tecnologia interdisciplinar, e que tem como uma de suas principais ferramentas o Sistema de Informação Geográfica

[4]DEUBER, R. Maturação da cana-de-açúcar na região sudeste do Brasil. *In*: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 4., 1988, Piracicaba. **Anais** [...] Piracicaba: Copersucar, 1988. p. 33-40.

(SIG[5]). Segundo Câmara *et al*. (1996), SIG são sistemas de informação construídos a fim de armazenar, analisar, e manipular dados geográficos, nas quais comportam diferentes tipos de dados e aplicações, mas, para isso, os dados devem estar georreferenciados, ou seja, localizados na superfície terrestre.

Tendo em vista, a diversidade de aplicações desta tecnologia, Câmara e Queiroz (2001, p. 1), destacam três maneiras de utilização "como ferramenta para produção de mapas; como suporte para análise espacial de fenômenos e; como um banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação de informação espacial." Entretanto, a tradução do mundo real para o mundo computacional exige certo domínio do pesquisador que faz uso desta tecnologia.

Com o avanço da tecnologia, os Sistemas de Informação Geográfica, tornaram-se instrumentos ainda mais eficazes na manipulação de dados, permitindo assim análises mais detalhadas e seguras.

2.4 Geoestatística

Os procedimentos utilizados no início do século XX baseavam-se na estatística clássica e buscavam representar o fenômeno a partir da média e do desvio padrão. Por volta de 1951, ao estudar concentrações de ouro, Daniel Krige atenta-se para as variâncias, que só tinham sentido se considerasse as distâncias entre as amostras analisadas, surge a partir daí a geoestatística, porém, o seu grande avanço só se consolidou com o professor Georges Matheron que desenvolveu a teoria das variáveis regionalizadas (CAMARGO, 1997). Desde então, ela vem sendo cada vez mais utilizada por pesquisadores das mais diversas áreas.

A geoestatística é, portanto, uma subárea da estatística aplicada, que leva em consideração nas suas aplicações a localização geográfica e a dependência espacial (CAMARGO, 1997).

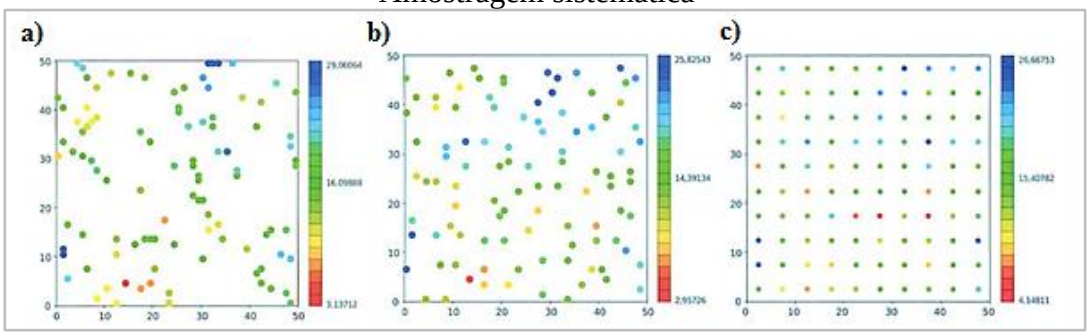
2.4.1 Conceitos básicos

Ao estudar um fenômeno espacial que se tem pouco conhecimento é necessário uma amostragem. A amostra reproduz a distribuição e a variabilidade espacial dos pontos de dados, sendo este representado em dado domínio 2D ou 3D. Em função disso, "qualquer

[5] Do inglês GIS (Geographic Information System).

estimativa baseada em pontos amostrais está, porém, sujeita a uma incerteza e, nesse sentido, a metodologia geoestatística se destaca ao oferecer a incerteza associada à estimativa" (YAMAMOTO; LANDIM, 2013, p. 20). Existem três métodos de amostragem (Figura 7): aleatória simples, aleatória estratificada e a sistemática, sendo o último considerado o método que oferece o melhor resultado, porém, a distribuição de pontos normalmente é semirregular ou irregular.

Figura 7 - a) Amostragem aleatória simples; b) Amostragem aleatória estratificada; c) Amostragem sistemática



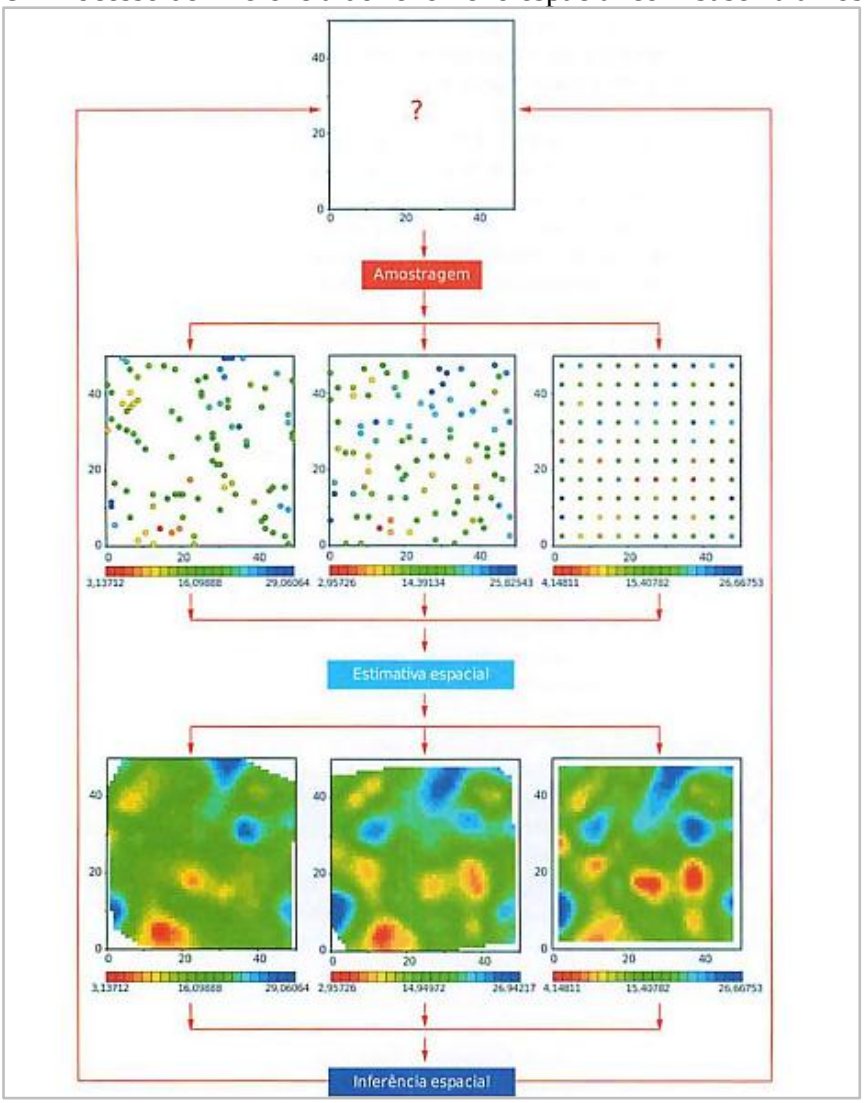
Fonte: Yamamoto e Landim (2013, p. 20-21).

A inferência espacial é uma etapa indispensável, pois, sabe-se que a amostragem nunca é realizada em pontos próximos devido a vários condicionantes, dessa forma, a qualidade vai depender não só do tamanho da amostra, mas, também, de sua distribuição espacial.

> O processo de reprodução das características do fenômeno espacial baseado em pontos amostrais é denominado interpolação ou estimativa. A interpolação ou estimativa de um ponto não amostrado é feita por meio do ajuste de funções matemáticas locais (pontos mais próximos ao ponto não amostrado) ou globais (todos os pontos amostrais). (YAMAMOTO; LANDIM, 2013, p. 21).

A Figura 8 evidencia três exemplos didáticos de inferência espacial por meio da estimativa. Nela são consideradas amostras do mesmo tamanho com distintas distribuições espaciais. Os três métodos reproduzem as características do fenômeno espacial, porém, a amostragem sistemática é ainda a que melhor reproduz esse processo, mas, cabe lembrar que na prática isso não ocorre.

Figura 8 - Processo de inferência do fenômeno espacial com base na amostragem



Fonte: Yamamoto; Landim (2013, p. 23).

Assim sendo, "o formalismo geoestatístico é baseado no conceito da dependência espacial e no entendimento de que cada ponto no espaço não apresenta um único valor, mas sim uma distribuição de probabilidade de ocorrência de valores" (YAMAMOTO; LANDIM, 2013, p. 24). A partir desse exposto, fica evidente que a variável regionalizada possui dependência espacial, ou seja, uma continuidade aparente.

Segundo Olea (1975), as características mais relevantes de uma varável regionalizada são:

> Localização: uma variável regionalizada é numericamente definida por um valor que está associado a uma amostra de tamanho, forma e orientação específicos [...]; Anisotropia: algumas variáveis regionalizadas são anisotrópicas [...]; Continuidade:

> a variação espacial de uma variável regionalizada pode ser extremamente grande ou muito pequena, dependendo do fenômeno. (OLEA, 1975, p. 2-3, tradução nossa)[6].

Logo, para compreender a variação espacial de uma variável regionalizada, é preciso "[...] levar em consideração a possibilidade de que o valor de cada ponto no espaço está relacionado, de algum modo, com valores obtidos de pontos situados a certa distância, sendo razoável supor que a influência é tanto maior quanto menor for a distância entre os pontos" (SOARES, 2006, p. 18 apud YAMAMOTO; LANDIM, 2013, p. 33)[7]. Dessa forma, a inferência da continuidade espacial de uma variável regionalizada pode ser analisada a partir do variograma ou de um semivariograma[8].

O semivariograma é a principal ferramenta das estimações e das simulações estocásticas, pois é ele que representa a variação de um fenômeno georreferenciado no espaço. O modelo teórico ajustado a ele permite identificar o valor da correlação espacial para qualquer distância dentro do espaço amostrado (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). De acordo com Camargo (1997), um semivariograma pode ser estimado por:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2, \quad (1)$$

onde:

- $\hat{\gamma}(h)$ é o semivariograma estimado;
- $N(h)$ é o número de pares de valores medidos, separados por um vetor distância h;
- $z(x_i)$ e $z(x_i + h)$ são valores da i-ésima observação da variável regionalizada, coletados nos pontos x_i e $x_i + h$ (i = 1, ..., n), separados pelo vetor h.

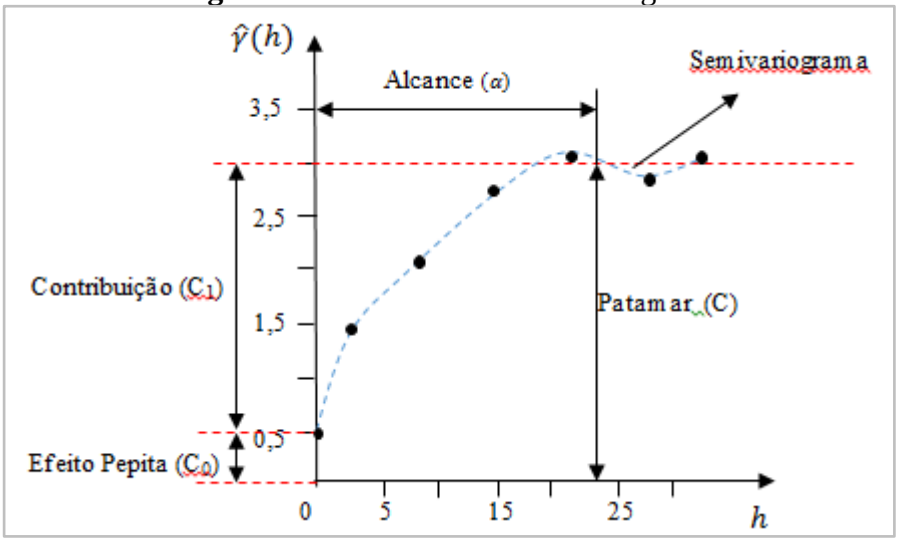
Os parâmetros do semivariograma podem ser observados por meio da Figura 9, e definidos por Camargo (1997) como:

- Alcance/Range (α): é a distância em que as amostras estão correlacionadas espacialmente;

[6] No original: Localization: a regionalized variable is numerically defined by a value which is associated with a sample of specific size, shape, and orientation […]; Anisotropy: some regionalized variables are anisotropic […]; Continuity: the spatial variation of a regionalized variable may be extremely large very small, depending on the phenomenon.
[7] SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. 2. ed. Lisboa: IST Press, 2006.
[8] Neste trabalho a terminologia preferencial é semivariograma.

- Patamar (C): é o valor do semivariograma que corresponde ao seu alcance (a), admite-se que não há mais dependência espacial entre as amostras, pois a variância entre os pares de amostras torna-se invariante conforme a distância;
- Efeito Pepita/Nugget (C_0): é uma descontinuidade na origem do semivariograma;
- Contribuição/Sill (C_1): é a diferença entre o Patamar (C) e o Efeito Pepita (C_0).

Figura 9 - Parâmetros do semivariograma

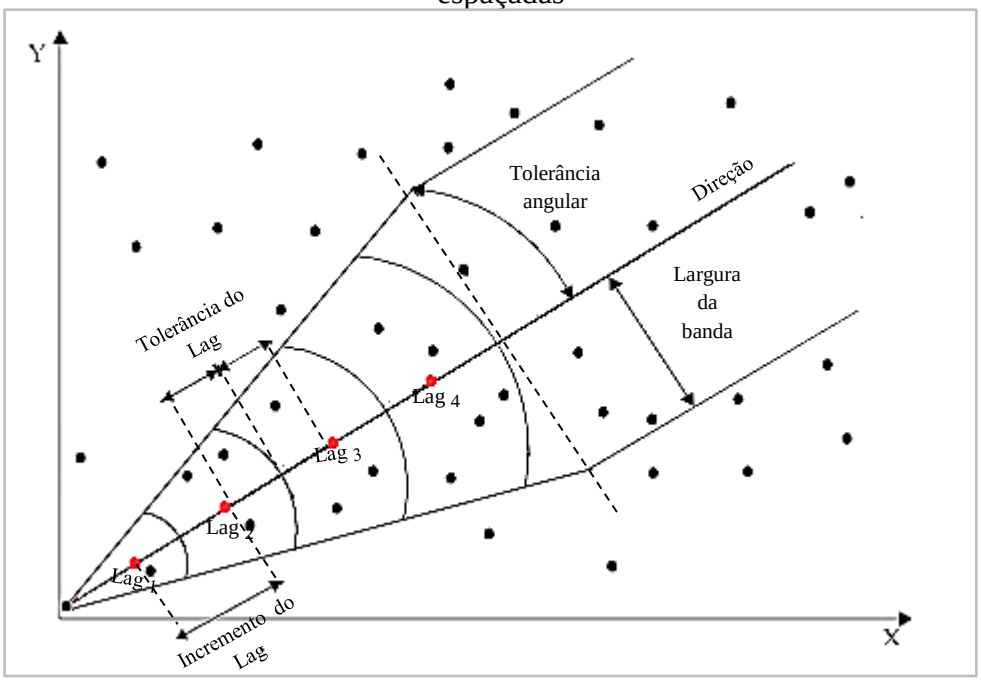


Fonte: Adaptada de Camargo (1997).

Para realizar o cálculo dos semivariogramas experimentais, é necessário verificar o tipo de distribuição espacial dos pontos amostrais na malha, que podem ser regulares ou irregulares. Para o primeiro tipo, em uma malha de duas dimensões, o semivariograma pode ser calculado diretamente nos pontos amostrais encontrados a uma distância h e ao longo de uma direção, as diferenças ao quadrado são calculadas, e os resultados são acumulados para obter a média (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Já, para o cálculo de semivariogramas com distribuição de pontos irregulares numa malha bidimensional é necessário introduzir limites de tolerância tanto para direção quanto para distância (CAMARGO, 1997) (Figura 10). Desse modo, tomando como referência um Lag (distância pré-definida) com incremento igual a 50 metros e com intervalo de tolerância de 25 metros e, com direção de 45º e ângulo de tolerância angular de 22.5º, qualquer par de observações que esteja dentro de um intervalo de 25 a 75 metros e de 22.5º e 67.5º será incluído no cálculo do semivariograma do Lag definido incialmente, isso se repete sucessivamente até que todos os Lags sejam considerados (CAMARGO, 1997). Ainda na Figura 10, a largura da banda é definida como um valor que limita a quantidade de pares de observações no cálculo do semivariograma (CAMARGO, 1997).

Figura 10 - Parâmetros para o cálculo do semivariograma a partir de amostras irregularmente espaçadas

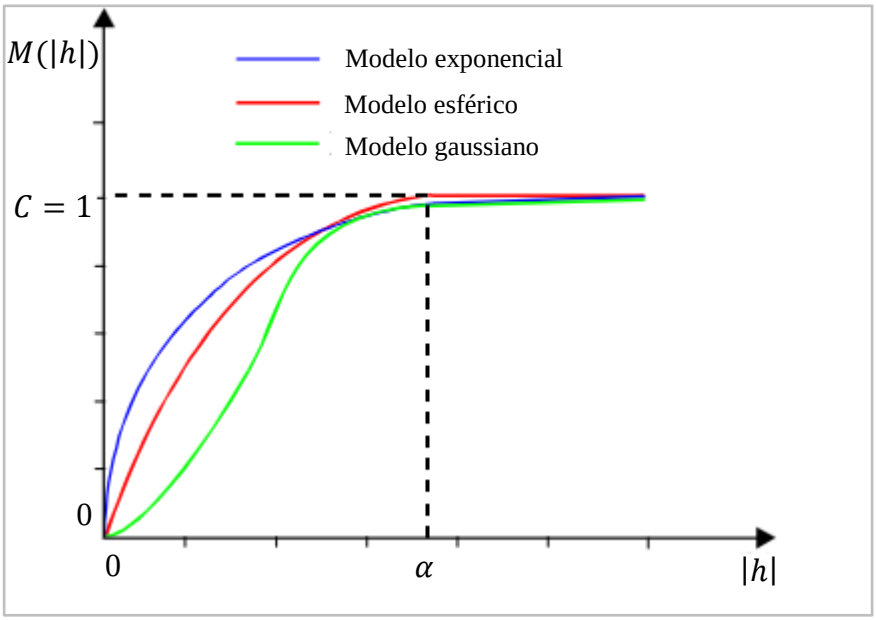


Fonte: Adaptada de Deutsch e Journel (1997) e Camargo (1997).

A função do semivariograma mede a variância entre pontos separados por uma distância h. Portanto, para pontos próximos a diferença é pequena, consequentemente a variância é pequena, ao aumentar a distância a variância aumenta decorrente dos valores dos pontos que se tornam mais diferentes, dessa maneira, a partir de certa distância a variância máxima se estabiliza, tendo o semivariograma com patamar, porém se ela continuar aumentando esses serão semivariogramas sem patamar (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Os modelos com patamar são referenciados como modelos transitivos, desses, os mais usuais são: esférico (Sph), exponencial (Exp) e gaussiano (Gau). Eles podem ser observados na Figura 11.

Figura 11- Representação gráfica de modelos transitivos



Fonte: Isaaks e Srivastava (1989, p. 374 apud CAMARGO, 1997, p. 17).

De acordo com Camargo (1997), os modelos transitivos são assim definidos:

O modelo esférico é um dos mais utilizados, sua equação normalizada é definida por:

$$\mathrm{Sph}(|h|) = \begin{cases} 0, & |h| = 0, \\ 1{,}5\left(\frac{|h|}{a}\right) - 0{,}5\left(\frac{|h|}{a}\right)^3, & 0 < |h| \leq a, \\ 1, & |h| > a. \end{cases} \quad (2)$$

A equação adaptada para o semivariograma é dada por:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & |h| = 0, \\ C_0 + C_1\left[\frac{3}{2}\left(\frac{|h|}{a}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{|h|}{a}\right)^3\right] = C_0 + C_1[\mathrm{shp}(|h|)], & 0 < |h| \leq a, \\ C_0 + C_1, & |h| > a. \end{cases} \quad (3)$$

O modelo exponencial também é muito utilizado, sua equação normalizada é definida por:

$$\mathrm{Exp}(|h|) = \begin{cases} 0, & |h| = 0, \\ 1 - \exp\left(-\frac{|h|}{a}\right), & |h| \neq 0. \end{cases} \quad (4)$$

A equação adaptada para o semivariograma é dada por:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & |h| = 0, \\ C_0 + C_1\left[1 - \exp\left(-\dfrac{|h|}{a}\right)\right] = C_0 + C_1[\mathrm{Exp}(|h|)], & |h| \neq 0. \end{cases} \quad (5)$$

O modelo gaussiano "[...] é frequentemente usado para modelar fenômenos extremamente contínuos" (ISAAKS, SRIVASTAVA, 1989, p. 375, tradução nossa)[9], sua equação é definida por:

$$\mathrm{Gau}(|h|) = \begin{cases} 0, & |h| = 0, \\ 1 - \exp\left(-\dfrac{|h|}{a}\right)^2, & |h| \neq 0. \end{cases} \quad (6)$$

A equação adaptada para o semivariograma é dada por:

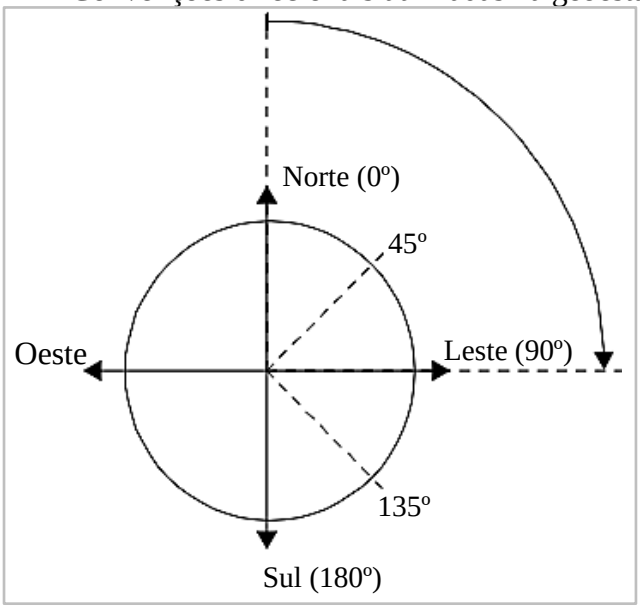
$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & |h| = 0, \\ C_0 + C_1\left[1 - \exp\left(-\dfrac{|h|}{a}\right)^2\right] = C_0 + C_1[\mathrm{Gau}(|h|)], & |h| \neq 0. \end{cases} \quad (7)$$

- Anisotropia

A anisotropia existe quando a função do semivariograma não se comporta de uma mesma forma nas direções norte, sul, leste e oeste, porém, quando a continuidade espacial é igual em todas as direções o fenômeno espacial é considerado isotrópico, para essa segunda ocorrência utiliza-se de apenas um semivariograma que contemple todas as direções, este é denominado de omnidirecional (CAMARGO, 1997). Na Figura 12 são apresentadas as convenções direcionais utilizadas na geoestatística.

[9] No original: [...] is often used to model extremely continuous phenomena.

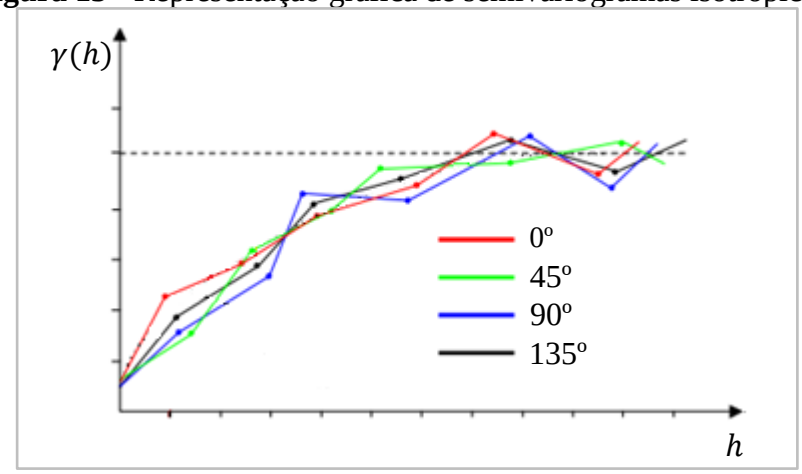
Figura 12 - Convenções direcionais utilizadas na geoestatística



Fonte: Camargo (1997, p. 22).

Os semivariogramas ilustrados na Figura 13 demonstram um fenômeno isotrópico para as direções 0º, 45º, 90º e 135º, pois é possível observar uma similaridade entre a distribuição dos pontos para todas as direções.

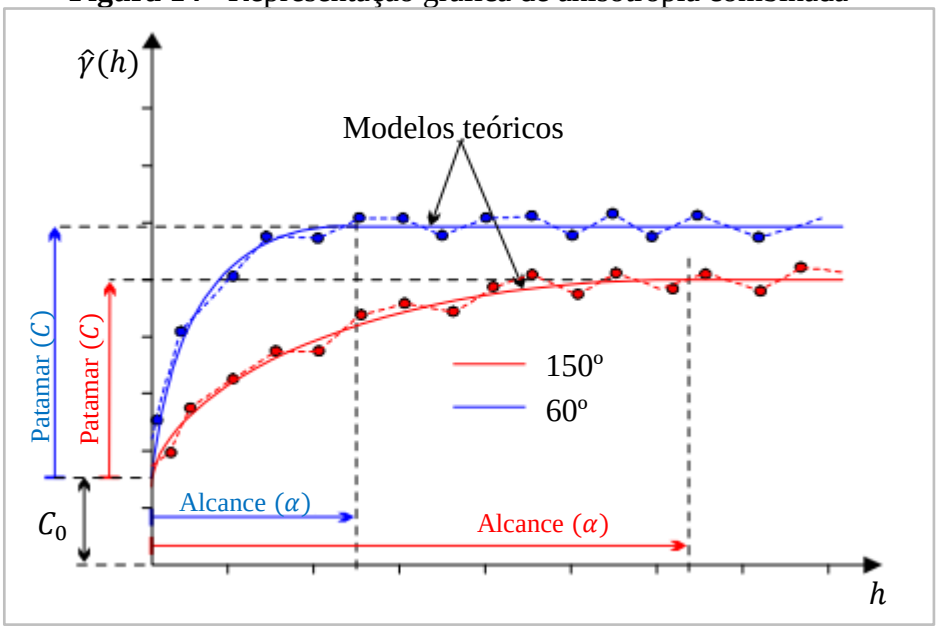
Figura 13 - Representação gráfica de semivariogramas isotrópicos



Fonte: Camargo (1997, p. 22).

De acordo com Camargo (1997), Yamamoto e Landim (2013), há três tipos de anisotropia: a geométrica que é quando se tem o mesmo patamar (C), porém os alcances (a) são distintos; a zonal que é quando os semivariogramas possuem os mesmos alcances (a), mas diferentes patamares (C) e a denominada de mista ou combinada que é a combinação da anisotropia geométrica e da zonal, ou seja, ambas variam conforme a direção, sendo esta a mais frequentemente observada nos fenômenos (Figura 14).

Figura 14 - Representação gráfica de anisotropia combinada



Fonte: Camargo (1997, p. 25).

2.4.2 Krigagem

A krigagem é constituída por um conjunto de técnicas de estimação de superfície, é ainda "[...] um processo geoestatístico de estimativa de valores de variáveis distribuídas no espaço e/ou tempo, com base em valores adjacentes quando considerados interdependentes pela análise variográfica" (YAMAMOTO; LANDIM, 2013, p. 55). Por ela apresentar estimativas não tendenciosas e a mínima variância relacionada ao valor estimado, é considerada como um bom método de estimação.

> O que diferencia a krigagem de outros métodos de interpolação é a estimação de uma matriz de covariância espacial que determina os pesos atribuídos às diferentes amostras, o tratamento da redundância dos dados, a vizinhança a ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado. Além disso, a krigagem também fornece estimadores com propriedades de não tendenciosidade e eficiência. (CAMARGO; FUCKS; CÂMARA, 2004, p. 11).

2.4.2.1 Krigagem Ordinária

A Krigagem Ordinária (KO) é considerada como uma técnica linear, pois ela utiliza da variável contínua na escala original de medida (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Logo, ao ser um método de estimativa local "o valor desconhecido de $Z(x_0)$ pode ser estimado por

meio de uma combinação linear dos n valores observados adicionado a um parâmetro, λ_0" (JOURNEL, 1988 apud CAMARGO, 1997, p. 29)[10]:

$$Z^*_{x_0} = \lambda_0 + \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z(x_i). \tag{8}$$

É desejado encontrar um estimador que não seja tendencioso, ou seja, a diferença entre o valor real e o valor calculado deve ser igual a zero, em média:

$$E\left[Z_{x_0} - Z^*_{x_0}\right] = 0. \tag{9}$$

A partir do exposto, impõe-se que as duas médias sejam iguais. Logo, aplicando a equação (8) em (9), tem-se:

$$E\left[Z_{x_0}\right] = E\left[\lambda_0 + \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \,.\, Z(x_i)\right] \Rightarrow m = \lambda_0 + \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \, m. \tag{10}$$

A Krigagem Ordinária não necessita do conhecimento da média m, em função disso, para que a igualdade da equação (10) seja satisfeita é fundamental que:

$$\lambda_0 = 0 \qquad \text{e} \qquad \sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1.$$

Desse modo, o estimador dela é:

$$Z^*_{x_0} = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \; Z(x_i) \;, \qquad \text{com} \qquad \sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1 \,. \tag{11}$$

Journel (1988 apud CAMARGO, 1997, p. 29), cita que minimizando a variância do erro $\left(Var\left[Z_{x_0} - Z^*_{x_0}\right]\right)$ com a condição de que $\sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1$, os pesos λ_i são obtidos a partir do seguinte sistema de equações da KO:

[10] JOURNEL, A. G. **Fundamentals of geostatistics in five lessons**. California: Stanford Center for Reservoir Forecasting; Department Applied Earth Sciences, 1988.

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{n} \lambda_j \, C(x_i, x_j) - \alpha = C(x_i, x_0) \quad \text{para } i = 1, \dots, n, \\ \sum_{j=1}^{n} \lambda_j = 1, \end{cases} \tag{12}$$

onde:

- $C\,(x_i, x_j)$ referem-se à função covariância correspondente a um vetor, h, com origem em x_i e extremidade em x_j;
- $C\,(x_i, x_0)$ referem-se a função covariância correspondente a um vetor, h, com origem em x_i e extremidade no ponto a ser estimado x_0 e;
- α é o multiplicador de Lagrange essencial para a minimização da variância do erro.

De acordo com Journel (1988 apud CAMARGO, 1997, p. 30), a variância minimizada do erro é dada por:

$$\sigma_{KO}^2 = \text{Var}\left[Z_{x_0} - Z^*_{x_0}\right] = C(0) - \sum_{i=1}^{n} \lambda_{\,i} \, C\,(x_i, x_0) - \alpha. \tag{13}$$

Logo, o sistema de Krigagem Ordinária (12) pode ainda ser escrito por meio da notação matricial:

$$K.\lambda \;= k \qquad\qquad \Rightarrow \qquad\qquad \lambda \;=\; K^{-1}.k, \tag{14}$$

onde:

- $K\ e\ k$ são matrizes das covariâncias e λ o vetor dos pesos.

$$K = \begin{vmatrix} C_{11} C_{12} \dots \dots \; C_{1n} & 1 \\ C_{21} C_{22} \dots \dots \; C_{2n} & 1 \\ \vdots \quad \vdots \qquad\qquad \vdots & \\ C_{n1} \; C_{n2} \dots \dots \; C_{nn} & 1 \\ 1 \quad 1 \quad \dots \dots 1 & 0 \end{vmatrix}, \lambda = \begin{vmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \alpha \end{vmatrix} \; e\ k = \begin{vmatrix} C_{10} \\ C_{20} \\ \vdots \\ C_{n0} \\ 1 \end{vmatrix}.$$

Segundo Journel (1988 apud CAMARGO, 1997, p. 30), a variância da KO é dada por:

$$\sigma_{KO}^2 = C(0) - \lambda^T . k. \tag{15}$$

2.4.3 Simulação estocástica

A krigagem estima $Z^*_{x_0}$ em um ponto não amostrado x_0 com base na informação dos n pontos vizinhos. Esse procedimento é realizado minimizando-se a variância do erro de estimativa, em função disso, tem-se o efeito de suavização, esse efeito acaba por superestimar valores pequenos e subestimar valores grandes, consequentemente passa a não reproduzir adequadamente as características da amostra (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Partindo deste efeito da krigagem, a simulação estocástica foi a alternativa que a geoestatística passou a utilizar para resolver essas incongruências, porém, ela ainda não é a solução ideal, dessa forma "na falta de uma solução perfeita, a escolha entre krigagem e simulação deve ser decidida com base no que é mais relevante para cada aplicação específica [...]" (OLEA, 1999, p. 141, tradução nossa)[11].

> Os métodos de simulação existentes procuram determinar aleatoriamente a componente de erro com base no conhecido método de Monte Carlo. Assim, como o processo é aleatório, as realizações serão diferentes entre si, mas honrando o histograma amostral e o modelo de variograma amostral. (YAMAMOTO; LANDIM, 2013, p. 147).

2.4.3.1 Simulação Gaussiana Sequencial

Soares[12] (2001, p. 911 apud YAMAMOTO; LANDIM, 2013, p. 148), cita que devido a "[...] simplicidade de execução, os métodos sequenciais de simulação tornaram-se os algoritmos mais comuns e populares para a reprodução da distribuição espacial e da incerteza de diferentes variáveis nas Ciências da Terra."

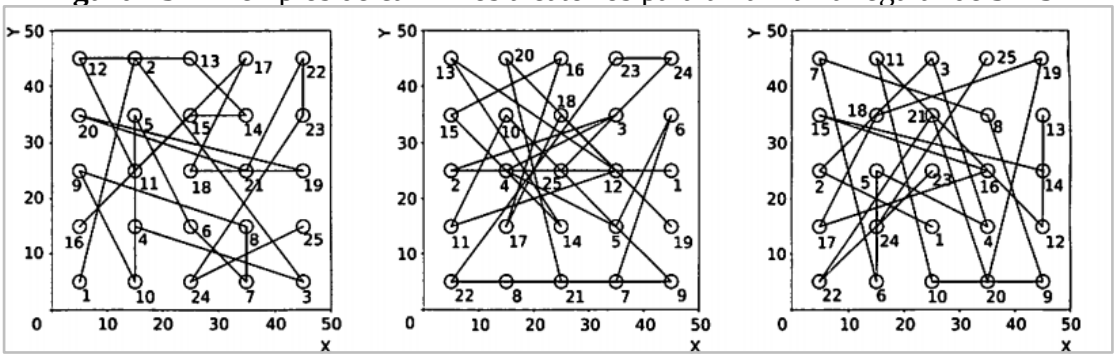
Considerando N variáveis aleatórias $\{Z(x_i),\ i = 1, \dots, N\}$, sob os nós de uma malha e condicionadas ao conjunto de dados $\{z(x_\alpha),\ \alpha = 1, \dots, n\}$, a SGS pode ser obtida por meio

[11] No original: Lacking a perfect solution, the choice between kriging and simulation must be decided based upon what is more relevant for each specific application […].
[12] SOARES, A. Direct sequential simulation and cosimulation. **Mathematical Geology**, New York, v. 33, p. 911-926, 2001.

das seguintes etapas apontadas por Goovaerts[13] (1997, p. 380 apud YAMAMOTO; LANDIM, 2013, p. 149-150):

- Transforma-se a distribuição da variável $Z(x)$ a uma distribuição normal, utilizando $Y(x) = \varphi\big(Z(x)\big)$, (onde: φ é a função de transformação para aqueles valores de distribuição normal), com média nula, $E[Y(x)] = 0$, e variância unitária $\mathrm{Var}\,[Y(x)] = 1$. Calcula-se o variograma experimental da variável transformada $Y(x)$ e tem-se o modelo de correlação espacial $\gamma_\gamma\,(h)$ que será usado na SGS. É importante lembrar-se de testar a hipótese de bigaussianidade. Se ela for normal, aceita-se a hipótese de multigaussianidade de dados.
- Por conseguinte a simulação é realizada para a variável $Y(x)$:
  - Define-se um caminho aleatório (Figura 15), para a sequência de simulação dos nós da malha.

Figura 15 - Exemplos de caminhos aleatórios para uma malha regular de 5 x 5



Fonte: Yamamoto e Landim (2013, p. 149).

  - Procede-se ao nó (x_0) da sequência definida, em que se escolhe n pontos de dados mais próximos, incluindo pontos amostrais e nós previamente simulados.
  - Faz-se a estimativa (x_0) por meio da Krigagem Simples (KS), em que o valor estimado $y^*_{KS}(x_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i\, y\,(x_i)$ será a média condicional e a variância de KS $\sigma^2{}_{KS}(x_0) = C(0) - \sum_{i=1}^{n} \lambda_i C(x_i - x_0)$, a variância condicional, as quais definem a Função de Distribuição Acumulada Condicional (FDAC).
  - A partir da determinação da FDAC em (x_0), o valor $y^l(x_0)$ é extraído aleatoriamente. Isso equivale a adicionar um resíduo aleatório à estimativa $y^*{}_{KS}(x_0)$, logo, o valor simulado é adicionado ao conjunto de dados.

[13] GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997.

- Repete-se o algoritmo para o próximo nó da sequência (x_0), definido pelo caminho aleatório, e assim sucessivamente, até que todos os nós sejam simulados.

- Por fim, obtém-se o conjunto de valores simulados $\{y^l(x_i), i = 1, \dots, n\}$ que estão no domínio da distribuição de Gauss. Assim sendo, esses valores devem ser transformados de volta para a escala original da variável:

$$z^l(x_i) = \varphi^{-1}\Big(y^l(x_i)\Big), i = 1, \dots, n. \tag{16}$$

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Materiais

Para auxiliar na criação, tabulação, padronização dos bancos de dados, elaboração de tabelas e gráficos foi utilizado o software Minitab 16[14] e o aplicativo Excel[15], ambos possuem objetivos muito próximos que é a edição de planilhas, porém o primeiro é um programa mais direcionado a fins estatísticos.

Este trabalho destaca também a utilização do software ArcGIS 10.3[16], nele são fornecidas ferramentas para análise espacial, assim como armazenamento, manipulação e processamento de dados. Além desse, utilizamos o Stanford Geostatistical Modeling Software (SGeMS)[17], o mesmo tem dois propósitos básicos: resolver problemas das variáveis espaciais e fornecer visualização em um ambiente interativo em três dimensões.

Os produtos cartográficos elaborados nesta pesquisa contaram com bases cartográficas disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)[18].

3.1.1 Dados de precipitação pluviométrica

Como já mencionado, o oeste do estado de São Paulo delimitado neste trabalho é composto por 250 municípios, no entanto, foram coletados dados mensais de 2007 a 2017 de apenas 90 postos pluviométricos.

Desses postos pluviométricos, 78 foram obtidos por meio do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) [19], autarquia essa gestora de recursos hídricos do estado de São Paulo e os outros 12 foram coletados no portal Agritempo[20], sendo esse um Sistema de Monitoramento Agrometeorológico, que disponibiliza tanto informações meteorológicas quanto agrometeorológicas de vários municípios e estados brasileiros.

[14] Desenvolvido na Peen State University (Pensilvânia).
[15] Excel é marca da Microsoft Corporation.
[16] ArcGIS 10.3 é marca registrada pela Esri (Environmental Systems Research Institute).
[17]Esse software é um pacote de computador de código aberto, desenvolvido pela Stanford University (Califórnia) e, está disponível para download em: http://sgems.sourceforge.net/?q=node/77.
[18] Disponível em: https://ibge.gov.br/.
[19] Disponível em: http://www.hidrologia.daee.sp.gov.br/.
[20] Disponível em: https://www.agritempo.gov.br/agritempo/jsp/Estatisticas/index.jsp?siglaUF=SP.

Cada posto pluviométrico possui uma planilha individual no Excel (Figura 16). Para então serem aplicadas as técnicas geoestatísticas os dados de precipitação pluviométrica tiveram que ser tabulados e padronizados no Minitab 16, em escala mensal e sazonal.

Figura 16 - Demonstrativo dos dados brutos de precipitação pluviométrica no Excel

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	PREFIXO:	B6-036											
2	NOME DO POST	VOTUPORANGA											
3	MUNICÍPIO:	VOTUPORANGA											
4	CURSO D'ÁGUA:	CARVALHO OU CACHOEIRINHA,COR											
5	LATITUDE:	20°26'23"											
6	LONGITUDE:	49°58'49"											
7													
8	Obs: valores com --- representam dados inexistentes.												
9													
10	Chuva Mensal (mm)												
11													
12	Ano	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
13	2007	708.9	227.5	136.7	11.9	94.2	0	64.7	0	0	52.5	76.9	137.7
14	2008	531.8	329.5	116	118.3	55.1	1.7	0	18.7	5.7	108.8	58.1	184.5
15	2009	275.2	255.4	220.1	45.1	40	17.4	17.8	73.9	176.3	106.9	152.3	384.3
16	2010	381.4	100	66.9	32.9	15.5	17.8	1.8	0	95.7	130.7	76.4	105.7
17	2011	334.8	322	450.2	61.7	8.9	35.1	0	21.9	8.4	84.4	93	143
18	2012	429.1	118.1	49.1	127.9	86.9	185	12.1	0	88.6	20.7	177.6	304.8
19	2013	245.6	161.7	164	34.6	56.4	67.9	39	0	78.2	73.6	123.4	185
20	2014	77.7	169.6	246.5	16.1	21.2	2.5	50.4	0	92.7	37.5	290.1	182.8
21	2015	196.9	187.7	193.7	28.6	73.9	15	55.3	6.8	130.2	172.8	279.7	210
22	2016	466.4	206.4	231.1	69.3	92.3	76.7		41.6	14.3	104.8	119.4	
23	2017	363	99.6	106.1	63.4	107.3	4.2	0	19.6	10.4	98.3	229.4	
24													

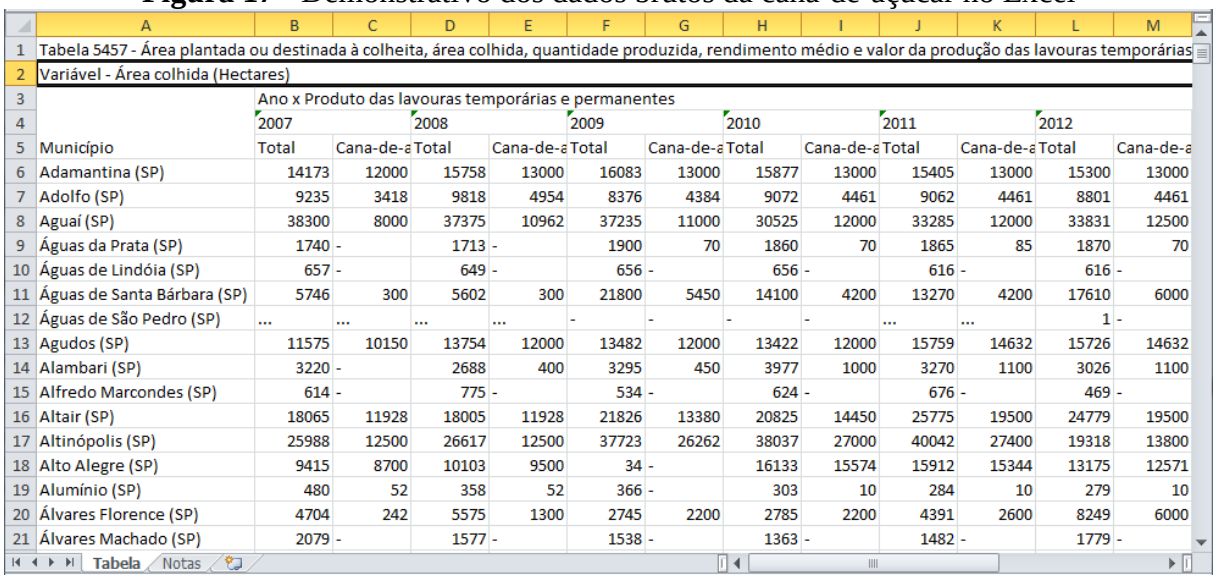
Pontalinda | Valentim Gentil | **Votuporanga** | Cosmorama | Sebastianopol

Fonte: São Paulo (2019).

3.1.2 Dados da cana-de-açúcar

Os dados anuais de 2007 a 2017, da área colhida, quantidade produzida e rendimento médio da produção por hectare da cana-de-açúcar para o estado de São Paulo, foram coletados no IBGE, sendo esse um instituto público da administração federal brasileira, considerado como o principal provedor de dados e informações do país. Foi por meio do Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA), especificamente no subitem Produção Agrícola Municipal (PAM), que se teve acesso aos dados, após o download, eles foram abertos diretamente no Excel (Figura 17). Antes de inseri-los ao SIG ArcGIS, os dados também foram tabulados e padronizados no Minitab 16.

Figura 17 - Demonstrativo dos dados brutos da cana-de-açúcar no Excel



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Tabela 5457 - Área plantada ou destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias												
2	Variável - Área colhida (Hectares)												
3		Ano x Produto das lavouras temporárias e permanentes											
4		2007		2008		2009		2010		2011		2012	
5	Município	Total	Cana-de-a	Total	Cana-de-a	Total	Cana-de-a	Total	Cana-de-a	Total	Cana-de-a	Total	Cana-de-a
6	Adamantina (SP)	14173	12000	15758	13000	16083	13000	15877	13000	15405	13000	15300	13000
7	Adolfo (SP)	9235	3418	9818	4954	8376	4384	9072	4461	9062	4461	8801	4461
8	Aguaí (SP)	38300	8000	37375	10962	37235	11000	30525	12000	33285	12000	33831	12500
9	Águas da Prata (SP)	1740	-	1713	-	1900	70	1860	70	1865	85	1870	70
10	Águas de Lindóia (SP)	657	-	649	-	656	-	656	-	616	-	616	-
11	Águas de Santa Bárbara (SP)	5746	300	5602	300	21800	5450	14100	4200	13270	4200	17610	6000
12	Águas de São Pedro (SP)	...	...	...	...	-	-	-	-	...	...	1	-
13	Agudos (SP)	11575	10150	13754	12000	13482	12000	13422	12000	15759	14632	15726	14632
14	Alambari (SP)	3220	-	2688	400	3295	450	3977	1000	3270	1100	3026	1100
15	Alfredo Marcondes (SP)	614	-	775	-	534	-	624	-	676	-	469	-
16	Altair (SP)	18065	11928	18005	11928	21826	13380	20825	14450	25775	19500	24779	19500
17	Altinópolis (SP)	25988	12500	26617	12500	37723	26262	38037	27000	40042	27400	19318	13800
18	Alto Alegre (SP)	9415	8700	10103	9500	34	-	16133	15574	15912	15344	13175	12571
19	Alumínio (SP)	480	52	358	52	366	-	303	10	284	10	279	10
20	Álvares Florence (SP)	4704	242	5575	1300	2745	2200	2785	2200	4391	2600	8249	6000
21	Álvares Machado (SP)	2079	-	1577	-	1538	-	1363	-	1482	-	1779	-

Tabela | Notas

Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2020).

3.2 Técnicas

3.2.1 Preenchimento de falhas no banco de dados de precipitação pluviométrica

Com os dados brutos de precipitação pluviométrica no Excel, foram identificados aqueles ausentes e iniciou-se o processo de preenchimento das falhas[21]. Para isso foi utilizada a média aritmética simples, uma técnica estatística comumente utilizada nesse tipo de procedimento. Ela foi realizada de forma manual, e priorizou-se pela proximidade de dois a três postos pluviométricos para obtê-la.

De acordo com Bisqueira, Sarriera e Martínez (2004), a média aritmética simples representa o valor médio da distribuição e, matematicamente, é dada por:

$$\overline{X} = \frac{\sum x_i}{n}, \tag{17}$$

onde:

- $\overline{X}$ é a média aritmética da amostra;
- x_i são os valores que a variável x assume;
- n é o número de valores.

[21] Consultar exemplo no APÊNDICE A – Informações complementares (p. 79).

3.2.2 Seleção dos anos representativos

Amparado por Jácomo (2011), realizamos a Análise de Agrupamento para selecionar os anos representativos de padrão habitual, seco e chuvoso. Essa técnica forma grupos homogêneos internamente e heterogêneos entre si, ela ainda faz parte de um conjunto maior de técnicas de Análise Multivariada (SILVESTRE; SANT'ANNA NETO; FLORES, 2013). Para isso, foram submetidos ao Minitab 16 dados mensais dos 90 postos pluviométricos (Figura 18)[22]. Antes de aplicá-la estabeleceu-se a medida de distância euclidiana apoiada ao método de agrupamento hierárquico de Ward, podendo esse ser definido como um procedimento:

> [...] no qual a similaridade usada para juntar agrupamentos é calculada como a soma de quadrados entre os dois agrupamentos somados sobre todas as variáveis. Esse método tende a resultar em agrupamentos de tamanhos aproximadamente iguais devido à sua minimização de variação interna. (HAIR JR *et al.*, 2009, p. 429).

Figura 18 - Demonstrativo dos dados de precipitação pluviométrica no Minitab 16 para a aplicação da Análise de Agrupamento

CLUESTERMESES.MTW ***

	C1-T	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	ano/meses	Rosana	Euclides d	Teodoro Sa	Presidente	Caiuá	Marabá Pa	Mirante do	Presidente
1	1a	336.03	220.40	250.17	317.01	208.4	325.60	221.50	379.30
2	1b	274.47	183.30	193.53	120.75	164.9	285.10	181.90	177.20
3	1c	120.60	46.50	181.98	46.26	74.8	30.00	138.60	88.70
4	1d	9.27	83.10	30.03	31.35	69.0	67.10	50.40	33.70
5	1e	22.89	43.70	24.78	57.24	79.0	75.30	67.30	79.90
6	1f	7.53	7.50	10.35	0.00	0.4	0.80	5.20	0.40
7	1g	260.64	160.00	300.00	142.23	209.5	194.00	231.40	248.90
8	1h	11.28	4.30	0.57	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00
9	1i	10.74	2.20	14.28	3.66	0.1	27.10	0.00	1.00
10	1j	65.64	82.00	96.24	60.03	14.4	48.30	58.30	52.30
11	1k	181.47	199.50	134.10	62.52	158.0	150.90	174.30	184.10
12	1l	114.57	113.80	104.43	68.34	220.6	147.40	182.90	210.50

Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.3 Aplicação das técnicas de geoestatística e elaboração dos produtos cartográficos

Foi utilizado o Stanford Geostatistical Modeling Software (SGeMS) para obter uma distribuição espaço-temporal mensal da precipitação pluviométrica, porém para isso o software exige a construção de uma grid, ela foi então definida com base nas coordenadas geográficas da área de estudo.

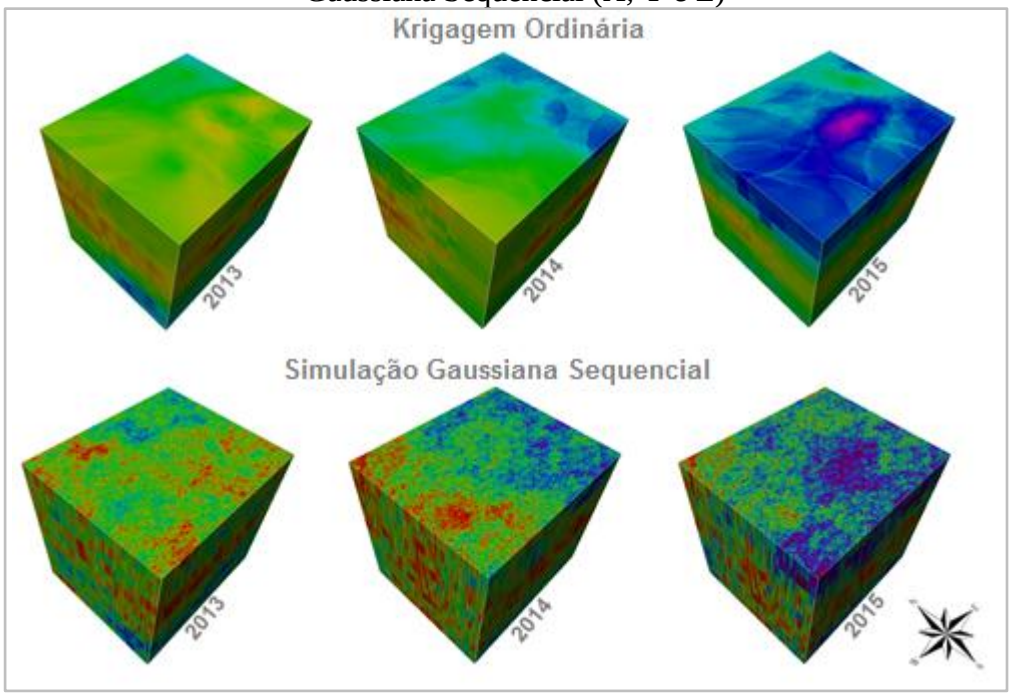
[22] Os anos de estudo de 2007 a 2017 estão enumerados no dendograma de 1 a 11, e os doze meses estão representados pelas letras do alfabeto de A até L.

Realizada essa etapa, foi utilizado o programa Exploratory data analysis mais especificamente a aba denominada Variogram, para o processo de modelagem dos semivariogramas omnidirecionais do conjunto de dados mensais de precipitação pluviométrica dos três anos padrão aqui evidenciados.

Num segundo momento, aplicou-se a estimação por Krigagem Ordinária por meio do programa Estimation mais especificamente na ferramenta Kriging (OK) e a Simulação Gaussiana Sequencial no programa Simulation na ferramenta SGSIM (Sequential Gaussian Simulation)[23].

Com as interpolações finalizadas, foi realizado um fatiamento (X e Y) nos blocos tridimensionais (Figura 19), tanto da estimação por Krigagem Ordinária quanto da Simulação Gaussiana Sequencial. Estes cortes foram organizados em painéis para verificar como se deu a distribuição e variação do fenômeno espaço-temporalmente. Além disso, foram ainda adquiridos os histogramas de ambas as técnicas aqui operadas para realizar uma análise comparativa.

Figura 19 - Blocos tridimensionais da estimação por Krigagem Ordinária e da Simulação Gaussiana Sequencial (X, Y e Z)



Fonte: Elaborado pela autora.

No SIG ArcGIS foi utilizada a Geostatistical Analyst, esta extensão é composta por

[23] Para execução da simulação é necessário definir um número de realizações para cada ano representativo, foram definidas quatro, porém ficou estabelecida a exposição da distribuição da precipitação pluviométrica daquelas que obtivessem a menor variância.

três ferramentas: Explore Data, Geoestatistical Wizard e Subset Features. Dentre elas, a primeira foi utilizada para analisar o comportamento dos dados e a segunda para modelar os semivariogramas omnidirecionais dos dados sazonais.

Uma vez feito esse procedimento, obtivemos a distribuição espacial da precipitação pluviométrica por meio da estimação por Krigagem Ordinária para toda área de estudo e, partir dessa etapa, construímos os produtos cartográficos.

Esse mesmo SIG foi utilizado na elaboração dos mapas referentes a produtividade anual da cana-de-açúcar para as safras de 2014 e 2015. Para que os dados fossem espacializados foi realizada a união de atributos do banco de dados do IBGE com o banco de dados da delimitação do oeste do estado de São Paulo, a partir do Geocódigo dos municípios, esse cruzamento de informações foi executado na ferramenta Join and Relates. Com os mapas finalizados eles foram incorporados a um único painel em conjunto com os fatiamentos (X e Y) dos blocos tridimensionais da estimação por Krigagem Ordinária da distribuição mensal da precipitação pluviométrica dos meses correspondentes aos do período de desenvolvimento de ambas as safras.

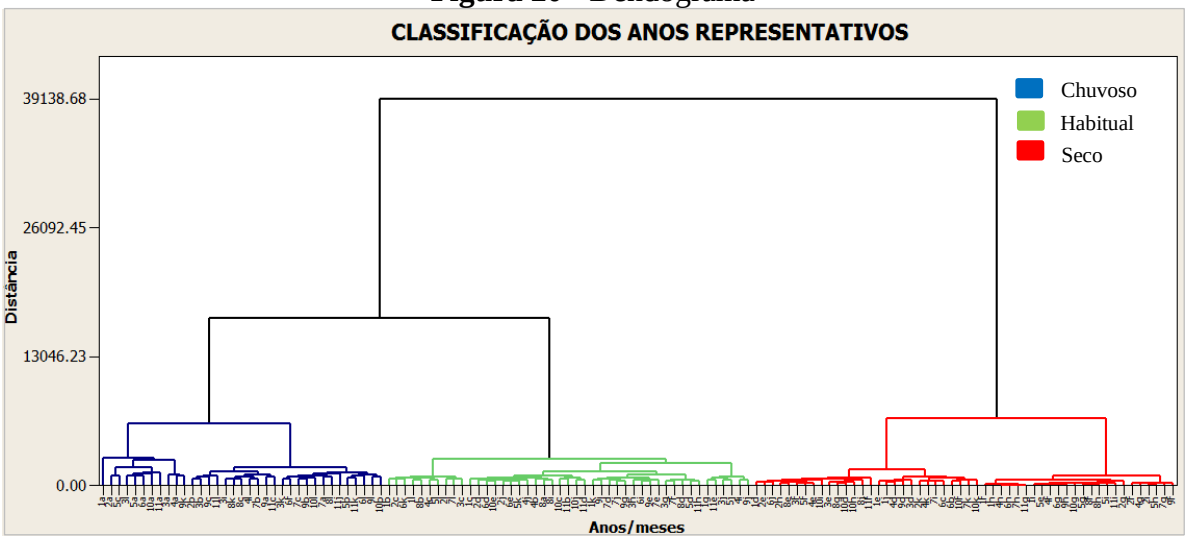
É importante enfatizar que para que fosse possível uma análise integrada foi preciso definir escalas padrão, uma que contemplasse a distribuição mensal (Krigagem Ordinária e Simulação Gaussiana Sequencial), outra direcionada a distribuição sazonal e uma última para a produtividade da cana-de-açúcar.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Anos representativos

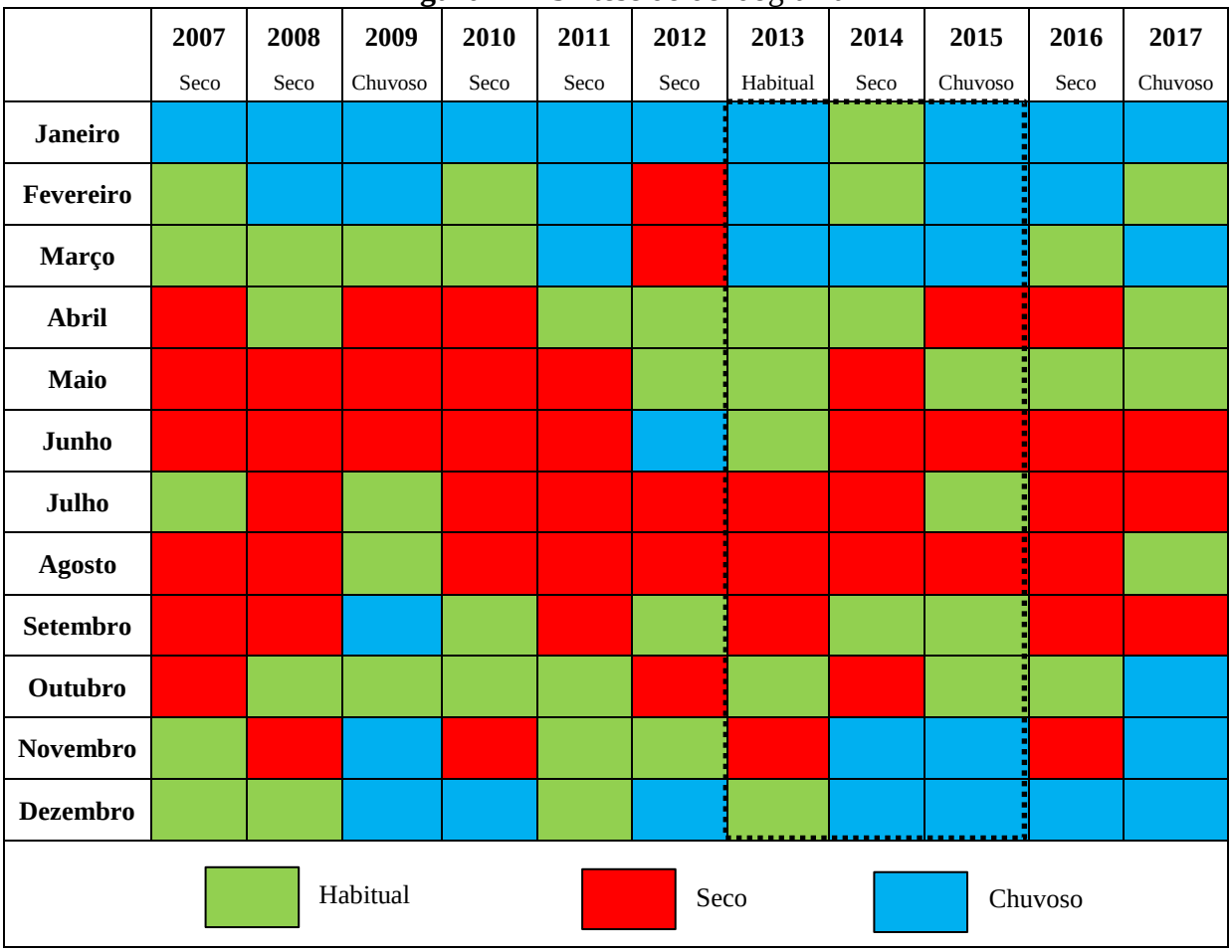
Definimos o número de agrupamentos (*clusters*), buscando encontrar anos de padrão habitual, seco e chuvoso. Gerou-se um dendograma (Figura 20) e, a partir dele, construímos um quadro síntese para que fosse possível distinguir os anos representativos (Figura 21). Dessa forma, o ano de 2013 foi considerado como ano habitual, os anos 2007, 2008, 2010, 2011, 2012, 2014 e 2016 foram definidos como secos e os anos 2009, 2015 e 2017 como anos chuvosos. A partir dessa etapa, foram estabelecidos os anos de 2013, 2014 e 2015 para serem representados e analisados nesta pesquisa.

Figura 20 - Dendograma



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 21 - Síntese do dendograma



Fonte: Elaborado pela autora.

Ainda na Figura 21, é possível visualizar que em 2013 (ano de padrão habitual), os primeiros meses que correspondem ao verão foram todos chuvosos, os três subsequentes foram habituais, aqueles que se referem ao inverno foram secos, outubro foi um mês habitual, novembro foi seco e dezembro novamente habitual. Em 2014 (ano de padrão seco), nota-se que os dois primeiros meses do ano foram habituais, março foi chuvoso e abril habitual, os próximos quatros meses (maio, junho, julho e agosto) foram secos, setembro foi habitual, e outubro novamente seco, novembro e dezembro foram chuvosos. Em 2015 (ano de padrão chuvoso), observa-se que os meses do verão foram chuvosos, os meses de abril a setembro foram intercalados entre secos e habituais, outubro foi habitual, já novembro e dezembro foram chuvosos.

4.2 Parâmetros e semivariogramas

Os parâmetros dos semivariogramas omnidirecionais da precipitação pluviométrica mensal de 2013, 2014 e 2015 podem ser visualizados na Tabela 1 e os semivariogramas na

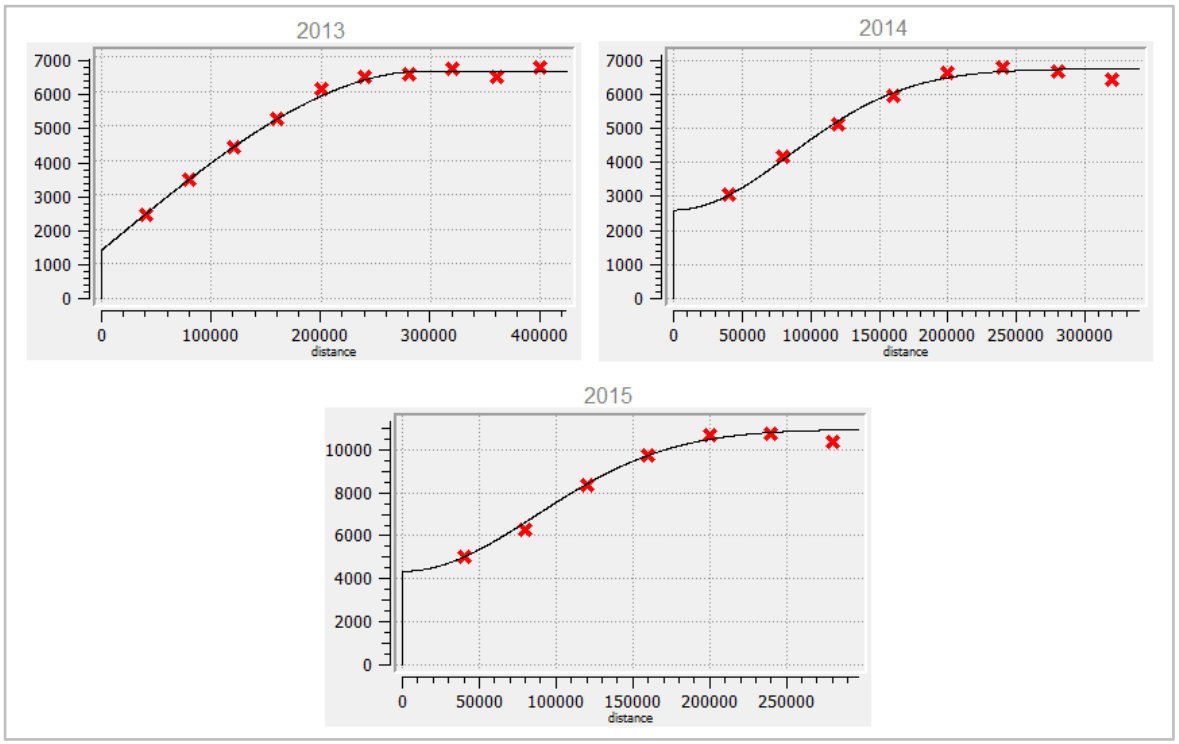
Figura 22. No ano de 2013 o raio de influência esteve em torno de 304000 metros e o modelo que mais se ajustou foi o esférico, em 2014 e 2015 observa-se que as dependências espaciais estiveram próximas, no ano seco ela esteve em torno de 240000 metros e no ano chuvoso em 224000 metros, o modelo ajustado para ambos os casos foi o gaussiano.

Tabela 1 - Parâmetros dos semivariogramas omnidirecionais da precipitação pluviométrica mensal de 2013, 2014 e 2015

PARÂMETROS	**2013 (ano padrão habitual)**	**2014 (ano padrão seco)**	**2015 (ano padrão chuvoso)**
Número de Lags	10	8	7
Separação dos Lags	40000	40000	40000
Tolerância entre os Lags	15000	20000	15000
Azimute da direção	0	0	0
Profundidade da direção	90	90	90
Tolerância da direção	100	100	100
Modelo	Esférico	Gaussiano	Gaussiano
Efeito Pepita/ Nugget (C_0)	1400	2600	4350
Alcance Máximo/ Range (α)	308000	240000	224000
Alcance Médio/ Range (α)	304000	240000	224000
Alcance Mínimo/ Range (α)	296000	208000	212800
Contribuição/ Sill (C_1)	5200	4150	6600
Patamar (C)	6600	6750	10950

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 22 - Semivariogramas omnidirecionais da precipitação pluviométrica mensal de 2013, 2014 e 2015



Fonte: Elaborado pela autora.

Os parâmetros dos semivariogramas omnidirecionais da precipitação pluviométrica sazonal de 2015[24] podem ser visualizados na Tabela 2 e os semivariogramas na Figura 23. A estação da primavera apresentou a maior dependência espacial, cerca de 310000 metros, o inverno por sua vez alcançou os 200000 metros, já o verão e o outono não atingiram nem mesmo os 100000 metros. Nas estações do verão e do outono o modelo ajustado foi o esférico e nas estações do inverno e da primavera foi o gaussiano. Deve ainda ser destacado, que no verão e na primavera o Efeito Pepita esteve elevado, demarcando que houve uma descontinuidade entre as amostras.

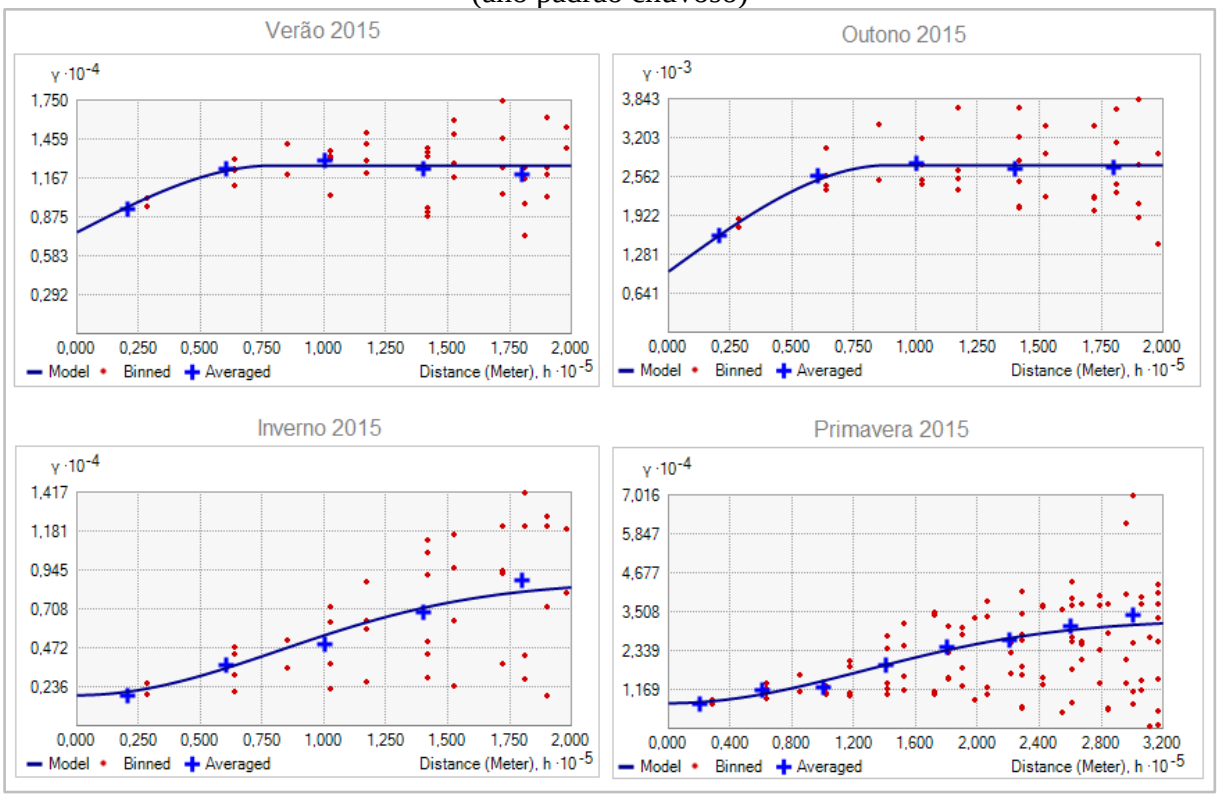
[24] Os parâmetros e os semivariogramas omnidirecionais da distribuição sazonal de 2013 e 2014 podem ser consultados em APÊNDICE A – Informações complementares (p. 80-83).

Tabela 2 - Parâmetros dos semivariogramas omnidirecionais da precipitação pluviométrica sazonal de 2015 (ano padrão chuvoso)

PARÂMETROS	VERÃO 2015	OUTONO 2015	INVERNO 2015	PRIMAVERA 2015
Modelo	Esférico	Esférico	Gaussiano	Gaussiano
Efeito Pepita/ Nugget (C_0)	7600	1000	1850	7600,9
Alcance/ Range (α)	79000	88900	200000	310000
Contribuição/ Sill (C_1)	5000	1750	6880	25000
Patamar (C)	12600	2750	8730	32600,9
Número de Lags	5	5	5	8
Separação dos Lags	40000	40000	40000	40000

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 23 - Semivariogramas omnidirecionais da precipitação pluviométrica sazonal de 2015 (ano padrão chuvoso)



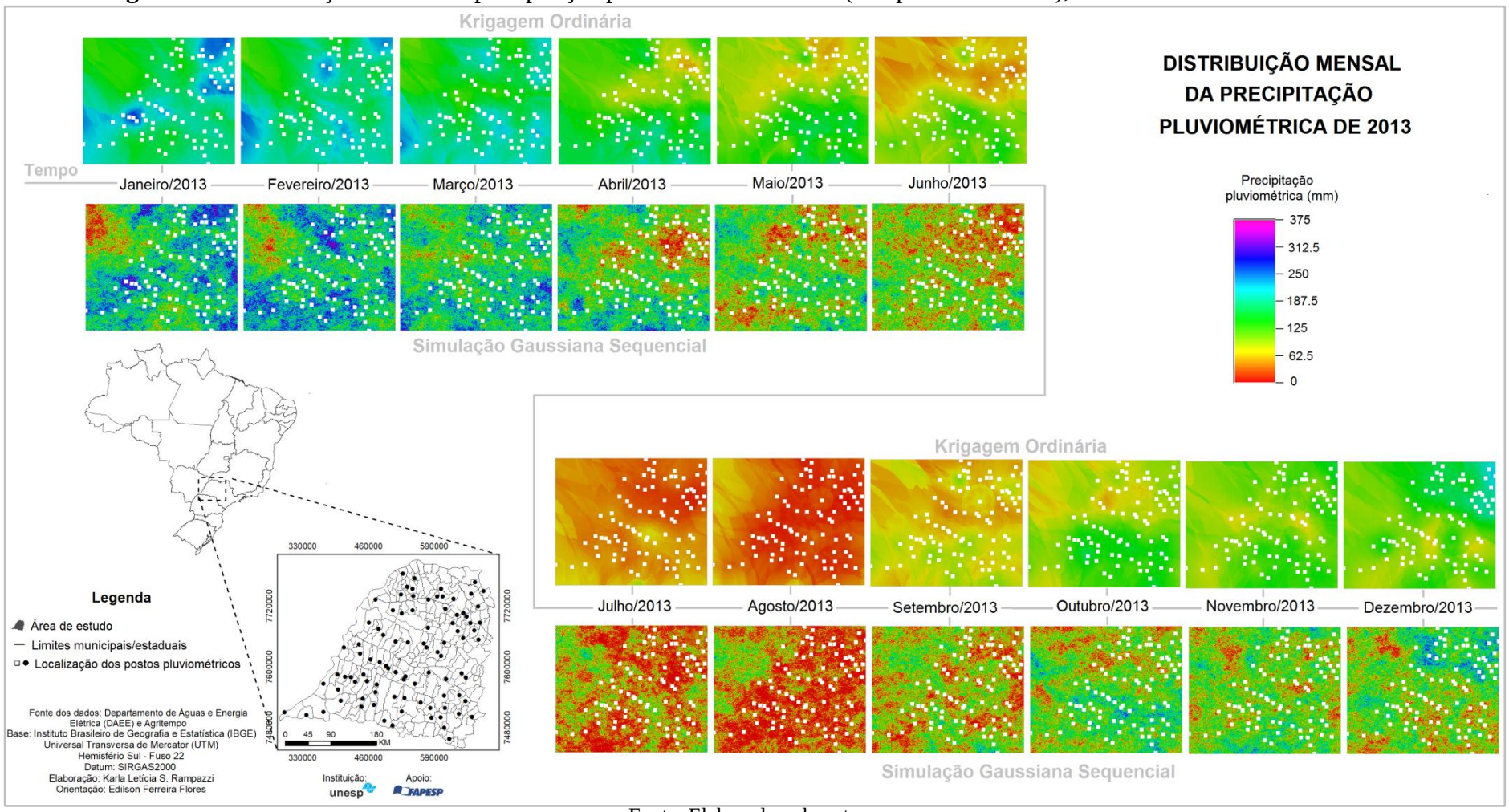
Fonte: Elaborado pela autora.

4.3 Distribuição espaço-temporal da precipitação pluviométrica de 2013 (ano padrão habitual)

Por meio da Figura 24 é possível observar que pela krigagem as precipitações em janeiro estavam mais concentradas na porção nordeste e sudoeste, essas chegaram a registrar

precipitações acima dos 250 milímetros, pela simulação, além dessas áreas, leste e sudeste também apresentaram índices elevados. Em fevereiro, as precipitações foram mais dispersas, no entanto, noroeste, nordeste, centro-sul e sudoeste tiveram índices expressivos, a distribuição pluviométrica no mês de março seguiu quase que a mesma distribuição do mês anterior, porém os volumes foram inferiores. Em abril, a porção norte apresentou volumes abaixo dos 100 milímetros, entretanto na porção sul houveram ainda áreas com índices superiores aos 180 milímetros, no mês de maio todo o setor norte apresentou-se como a área mais seca, em junho essa mesma porção que já vinha apresentando baixos volumes pluviométricos teve índices inferiores aos 70 milímetros, as demais ainda apresentaram volumes mais elevados. Julho e agosto foram os dois meses mais secos para este ano, principalmente agosto que chegou a ter volumes inferiores a 20 milímetros. A partir de setembro as chuvas foram pouco mais significativas. Em outubro, os índices foram ainda mais expressivos, no entanto a região norte ainda continuou como sendo a área mais seca. Em novembro, os volumes foram mais elevados e o último mês do ano, a área seca inverteu-se, logo a mais úmida predominou-se a nordeste pela krigagem e, pela simulação, essa porção estendeu-se também a noroeste.

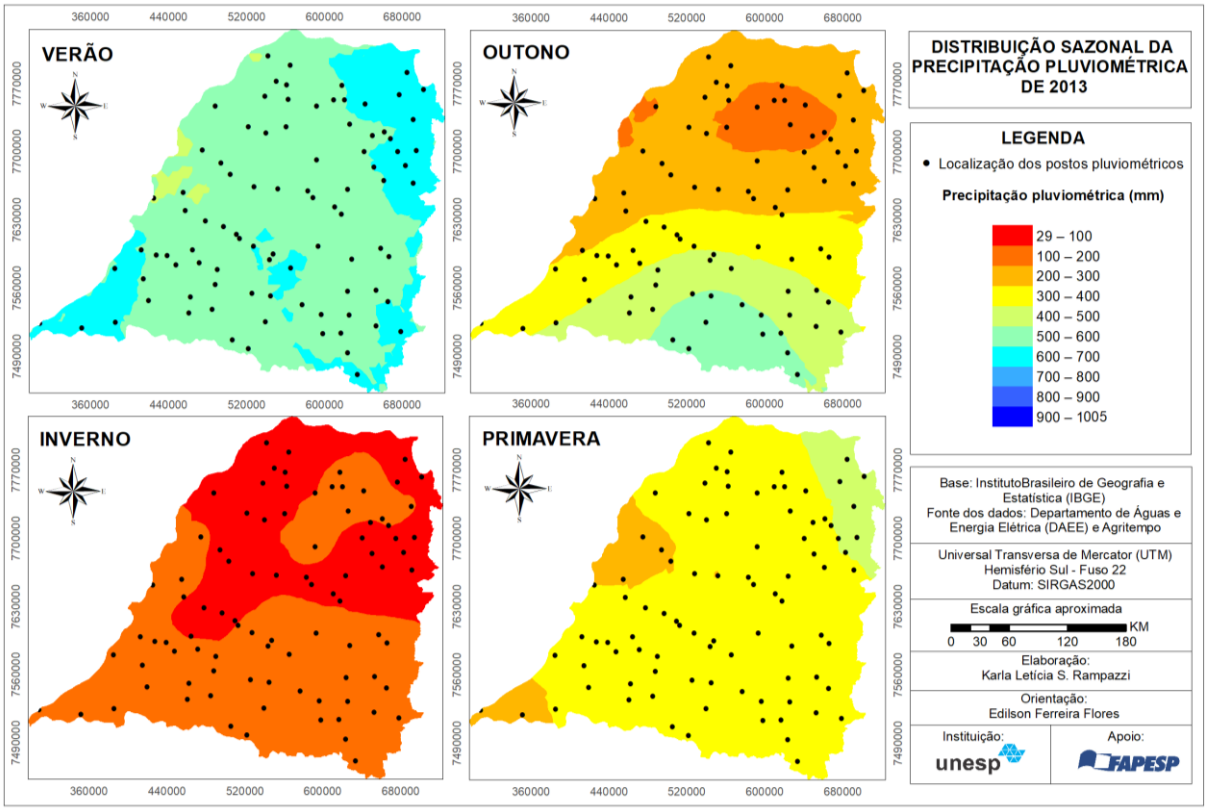
Figura 24 - Distribuição mensal da precipitação pluviométrica de 2013 (ano padrão habitual), no oeste do estado de São Paulo



Fonte: Elaborado pela autora.

Os mapas da estimação por Krigagem Ordinária de 2013, para dados sazonais de precipitação pluviométrica, podem ser visualizados na Figura 25. Todo o oeste do estado de São Paulo na estação do verão foi contemplado por altos índices pluviométricos que variaram em torno de 400 a 700 milímetros. No outono, as áreas mais chuvosas ficaram restritas a região sul, os volumes atingiram até 600 milímetros, em contraposição toda a faixa que se estende de leste a oeste e a porção norte apresentou índices inferiores a 300 milímetros. Na estação do inverno o volume de chuvas para todo oeste paulista aqui delimitado esteve entre 29 a 200 milímetros, com destaque para o norte que esteve dentre as áreas mais secas. Por fim, na primavera os volumes que variam de 300 a 400 milímetros predominaram, com exceção de alguns setores localizados a sudoeste e a oeste, que tiveram índices abaixo deste, e da região nordeste que registrou índices superiores aos 400 milímetros.

Figura 25 - Distribuição sazonal da precipitação pluviométrica de 2013 (ano padrão habitual), no oeste do estado de São Paulo

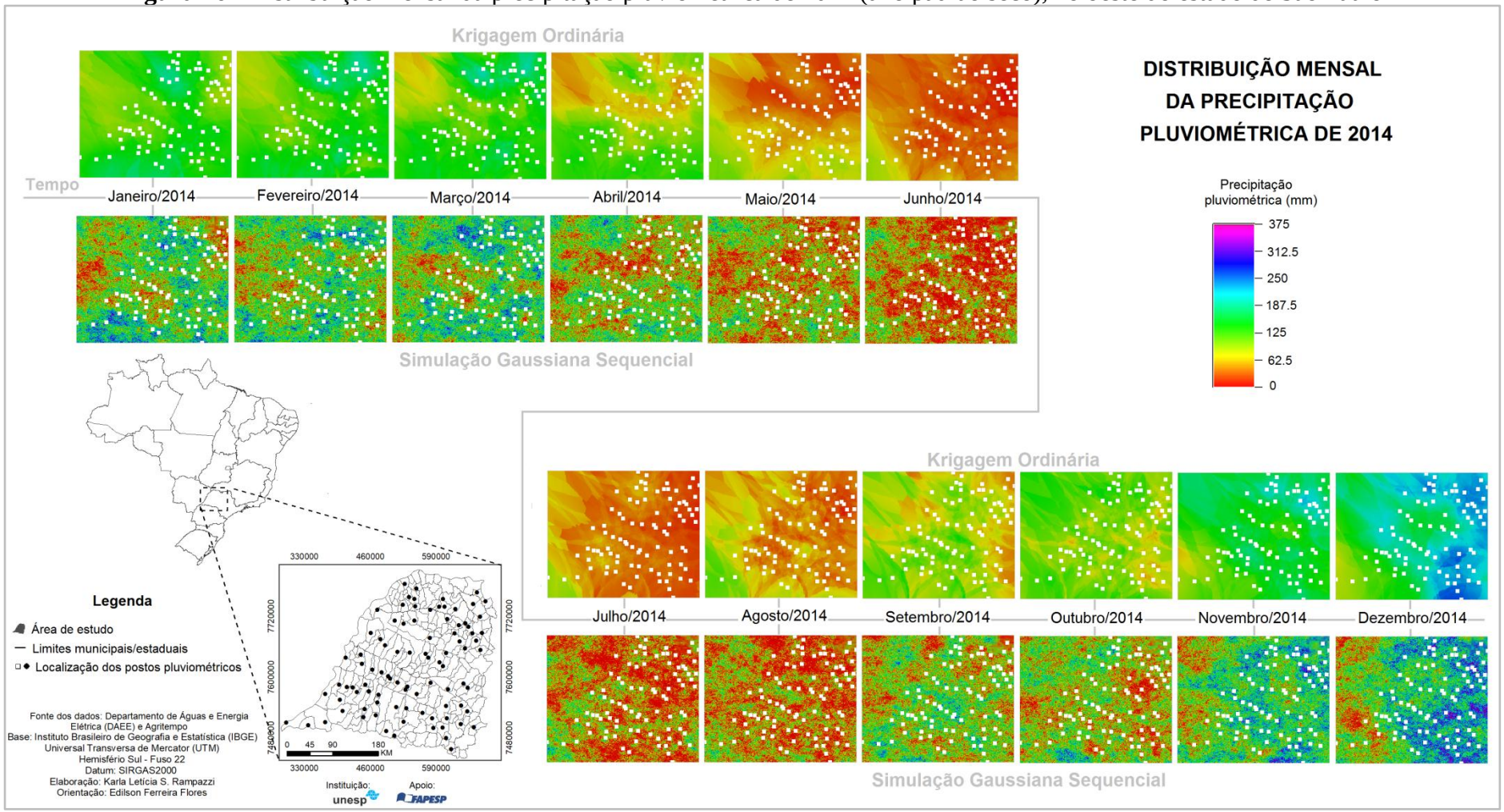


Fonte: Elaborado pela autora.

4.4 Distribuição espaço-temporal da precipitação pluviométrica de 2014 (ano padrão seco)

É possível verificar na Figura 26 que nos três primeiros meses do ano (janeiro, fevereiro e março) os volumes pluviométricos variaram pouco de um mês para outro, é perceptível que os índices deste ano foram inferiores comparado com os mesmos meses do ano anterior, é importante enfatizar que como a krigagem tem o efeito de suavização ela realçou apenas uma porção mais úmida concentrada ao norte, como a simulação não tem esse efeito, ela identificou outras áreas chuvosas assim como áreas secas. No mês de abril as chuvas começam a ficar ainda mais rarefeitas na porção oeste-norte. De maio a agosto verifica-se pela krigagem que praticamente toda a área de estudo com exceção de uma pequena porção localizada a sudoeste foi castigada pelos baixos índices pluviométricos, principalmente nos meses de junho e julho. Em setembro, os volumes começaram a se elevar e, em outubro, foram mais expressivos. No mês de novembro, é possível diagnosticar pela krigagem que a porção norte obteve índices superiores aos 180 milímetros, pela simulação houveram outras áreas com volumes expressivos como ao sul. Mas é apenas em dezembro que se têm índices acima dos 230 milímetros para uma faixa na direção leste que se estendeu de norte a sul.

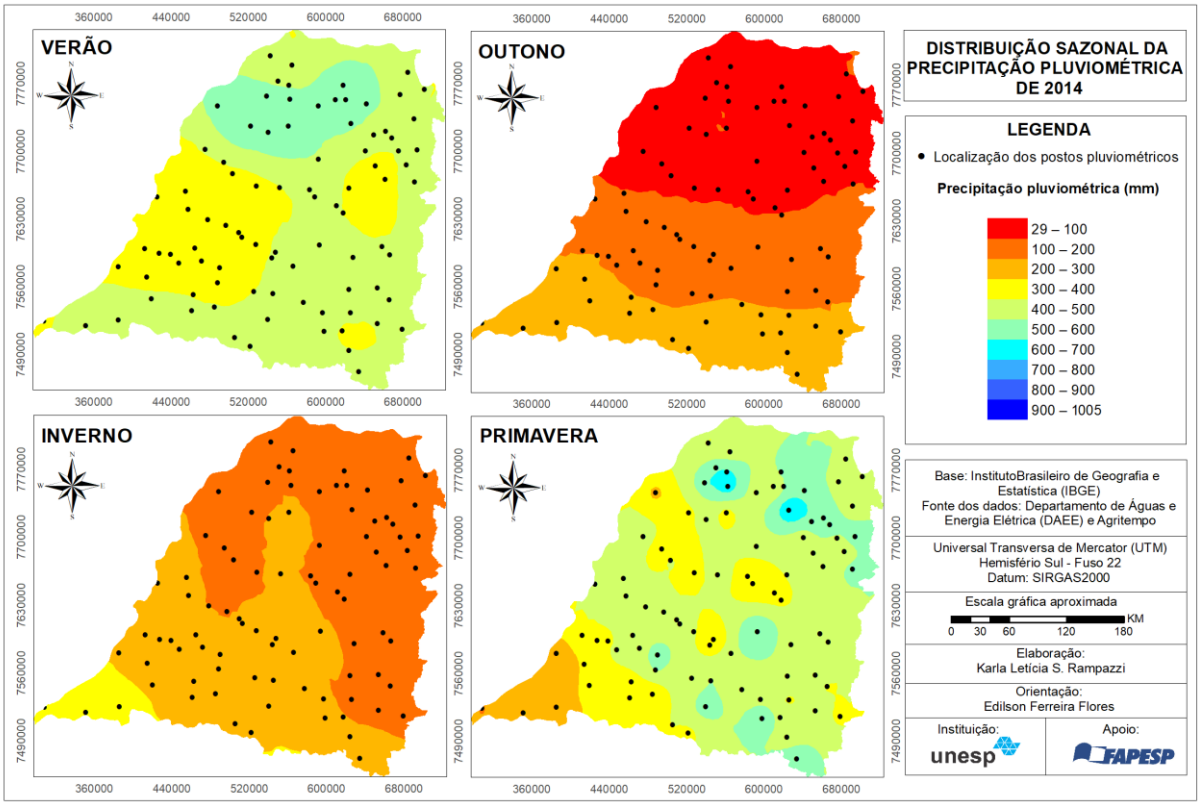
Figura 26 - Distribuição mensal da precipitação pluviométrica de 2014 (ano padrão seco), no oeste do estado de São Paulo



Fonte: Elaborado pela autora.

Os mapas da estimação por Krigagem Ordinária de 2014, para dados sazonais de precipitação pluviométrica, estão representados na Figura 27. A estação do verão não foi tão chuvosa quanto a mesma estação do ano de 2013, nessa a maior amplitude (até 600 milímetros) deu-se na orientação norte-noroeste. A estação do outono foi detentora de baixos índices pluviométricos, de sudeste a sudoeste instalou-se uma faixa com os índices pouco mais elevados, mesmo assim, esses não ultrapassaram os 300 milímetros. No inverno os volumes registrados aumentaram comparados com aqueles da estação anterior, a região mais seca, por sua vez, predominou entre norte-leste e a mais úmida a sudoeste. Na primavera, a distribuição das chuvas se deu de forma descontínua, com volumes que variaram de 200 a 700 milímetros, a porção mais seca ficou restrita a sudoeste, e a mais úmida entre norte-nordeste.

Figura 27 - Distribuição sazonal da precipitação pluviométrica de 2014 (ano padrão seco), no oeste do estado de São Paulo

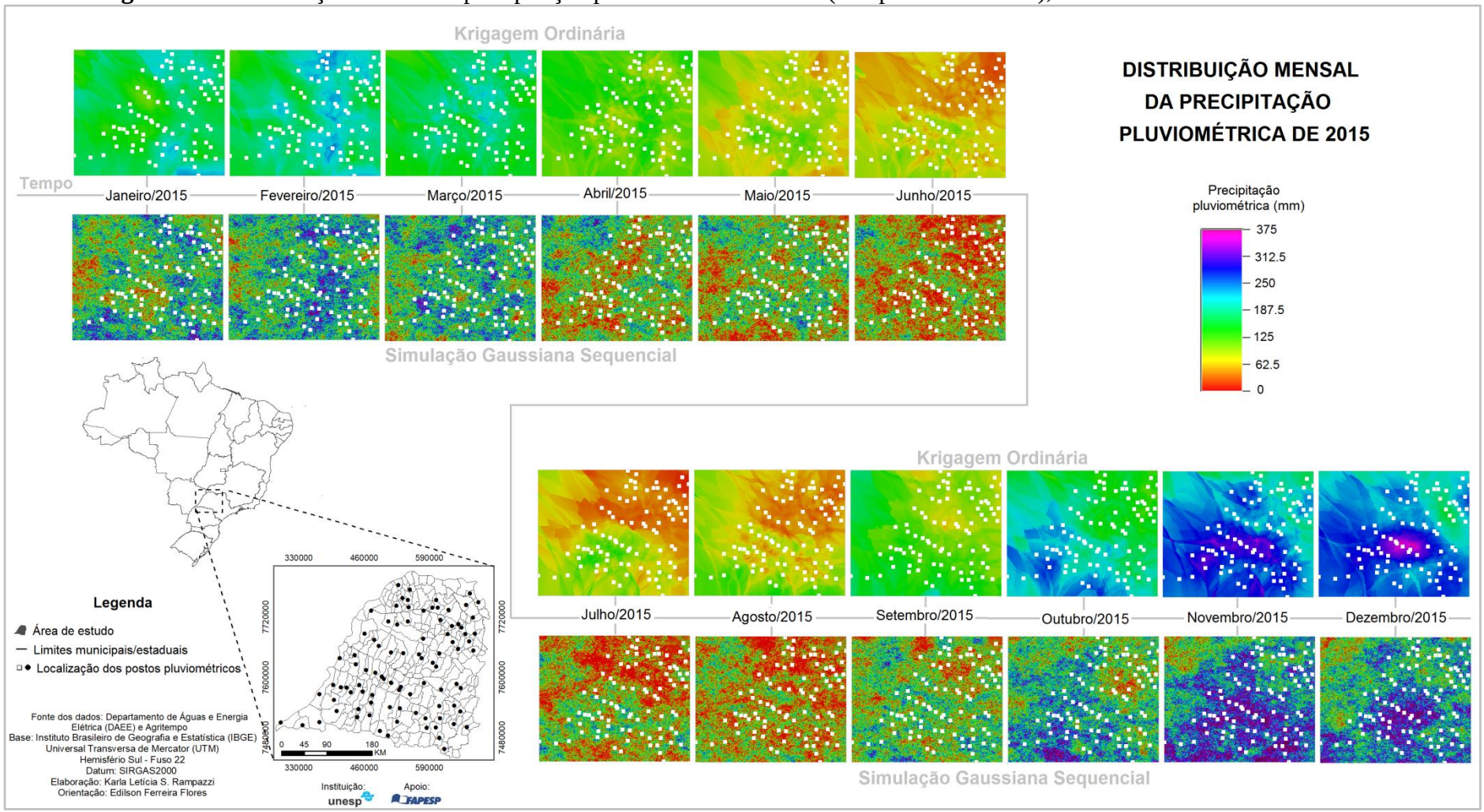


Fonte: Elaborado pela autora.

4.5 Distribuição espaço-temporal da precipitação pluviométrica de 2015 (ano padrão chuvoso)

Na distribuição da precipitação pluviométrica mensal de 2015, representada pela Figura 28, é possível constatar pela krigagem, que em janeiro a porção mais seca ficou concentrada entre oeste-sudoeste, porém, pela simulação, essa estava situada apenas a oeste, em fevereiro é perceptível que os índices pluviométricos aumentaram para toda a área de estudo, algumas áreas registaram acima dos 200 milímetros, em março nota-se uma queda nos volumes e em abril verifica-se que esses índices diminuíram ainda mais, no mês de maio a porção central da área de estudos pode ser considerada como a mais úmida. De junho a agosto percebe-se pela krigagem que na porção sudoeste-sul estavam situadas as áreas privilegiadas pelas chuvas e ao norte estavam as áreas mais secas, em setembro, os índices voltaram a se elevar, porém porção norte ainda continuou como sendo a mais seca. Em outubro, os índices mais elevados foram registrados entre oeste-sudoeste-sul esses ultrapassaram os 230 milímetros, mas é apenas nos dois últimos meses do ano que praticamente toda área de estudo apresenta volumes bem expressivos, a porção central do oeste, em dezembro chegou a ultrapassar os 350 milímetros mensais.

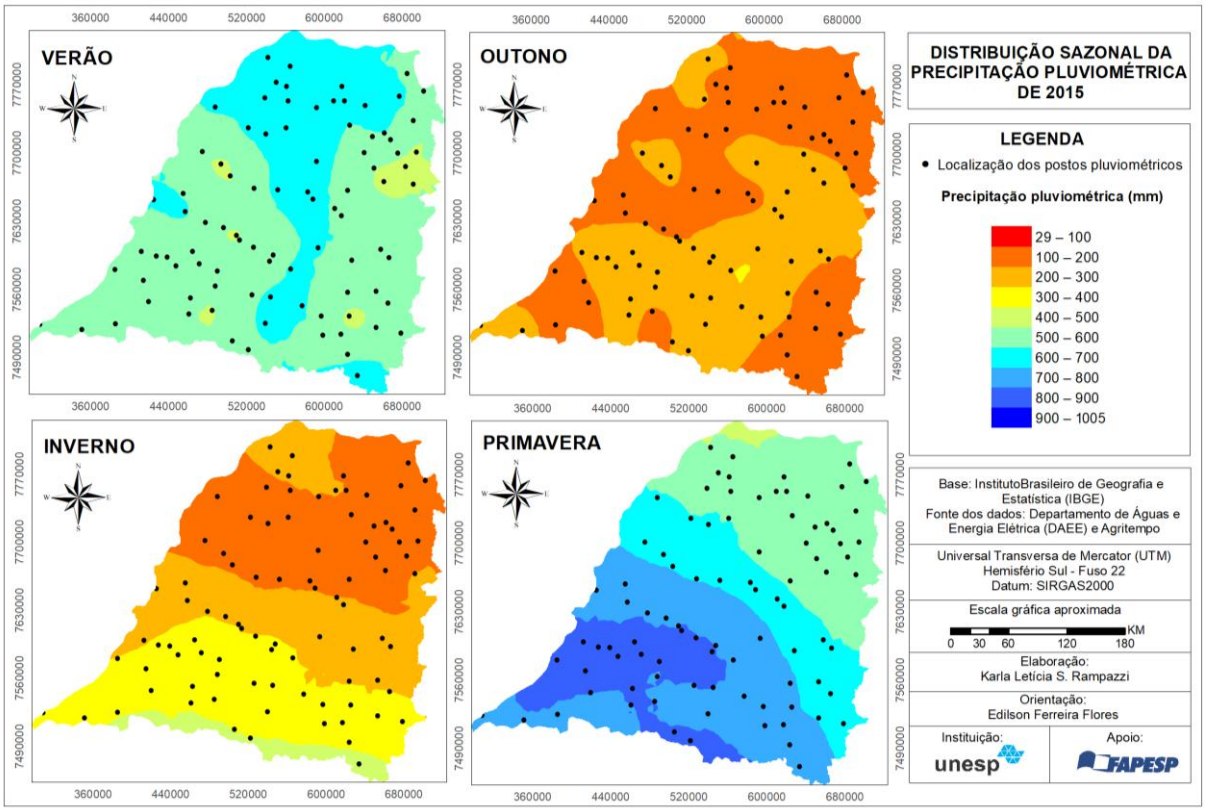
Figura 28 - Distribuição mensal da precipitação pluviométrica de 2015 (ano padrão chuvoso), no oeste do estado de São Paulo



Fonte: Elaborado pela autora.

Quanto aos mapas da estimação por Krigagem Ordinária de 2015, para dados sazonais de precipitação pluviométrica, esses podem ser observados na Figura 29. A estação do verão, é marcada por uma faixa se estende de norte a sul, essa chegou a registrar até 700 milímetros. A estação do outono pode ser considerada a mais seca deste ano, pois seus índices não ultrapassaram os 300 milímetros. No inverno mesmo que o volume de chuvas estivesse baixo, estes ainda foram superiores aos do outono, as chuvas seguiram seu deslocamento de forma crescente de norte a sul. A primavera foi a estação mais chuvosa dentre todas as estações dos três anos representativos, assim como na estação do inverno a distribuição das chuvas seguem quase que um mesmo padrão, só que com um deslocamento mais a sudoeste, região essa que apresenta os índices mais elevados.

Figura 29 - Distribuição sazonal da precipitação pluviométrica de 2015 (ano padrão chuvoso), no oeste do estado de São Paulo



Fonte: Elaborado pela autora.

Podemos associar os elevados índices pluviométricos de 2015, ao fenômeno El Niño, pois de acordo com os monitoramentos realizados pelo CPTEC/INPE, ocorreu um evento entre 2015 e 2016 e sua intensidade foi considera como sendo forte[25] (EL NIÑO..., [2016]).

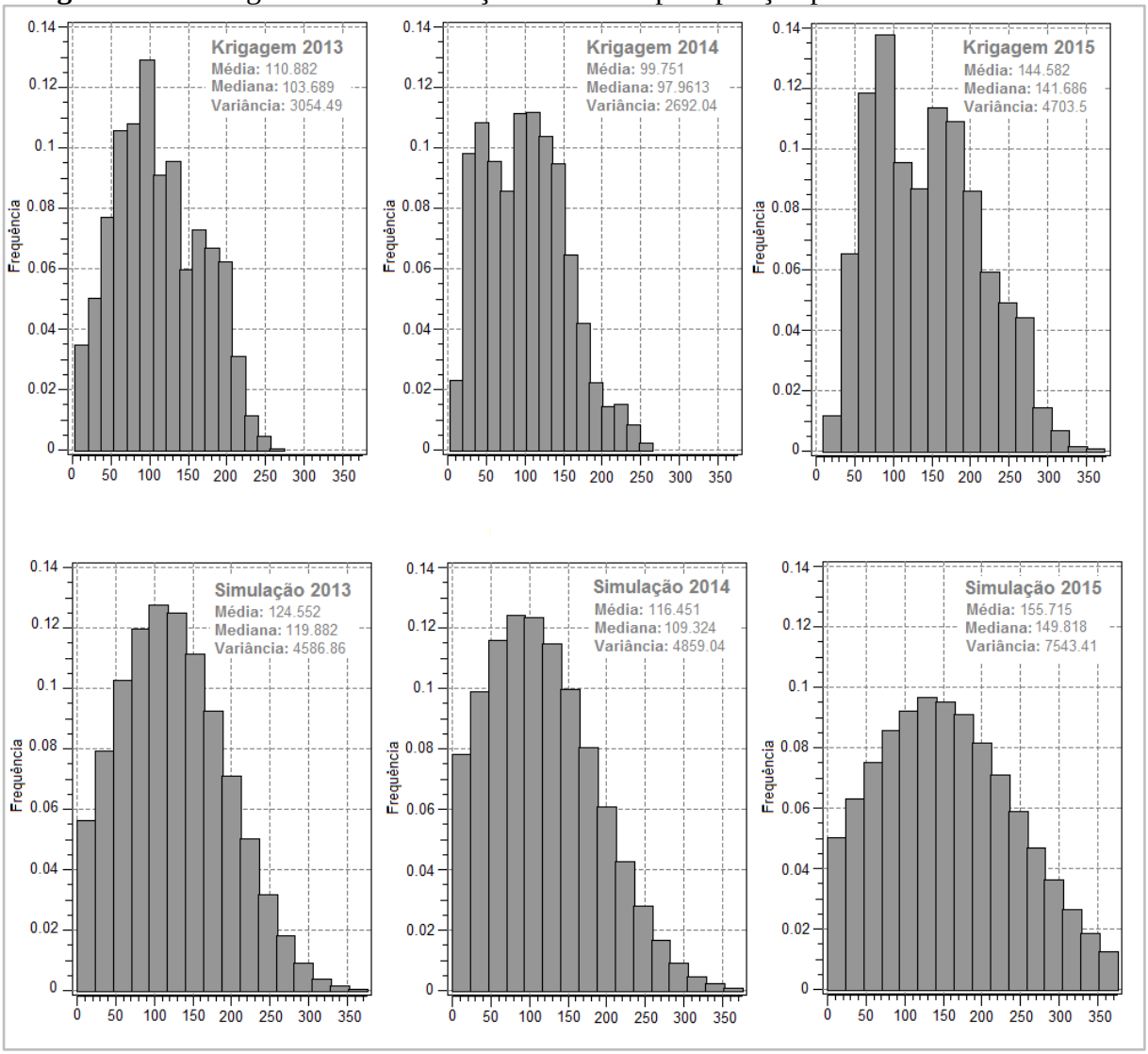
[25] Anos com intensidade forte são aqueles em que a anomalia de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) é superior a 1,5°C em algum dos meses pertencentes à série.

Mesmo que nessa porção do território paulista os efeitos não sejam muito influentes, as variações nos volumes acumulados já são perceptíveis.

4.6 Histogramas da Krigagem Ordinária e da Simulação Gaussiana Sequencial do SGeMS

Os histogramas da distribuição mensal da precipitação pluviométrica, ilustrados na Figura 30, evidenciam alta variabilidade, uma das causas é que o SGeMS estima a porção da grid em que não há dados (noroeste), mesmo com essa limitação do software é possível visualizar que as variâncias da Krigagem Ordinária são inferiores as da Simulação Gaussiana Sequencial, quando comparados os anos padrão correspondentes.

Figura 30 - Histogramas da distribuição mensal da precipitação pluviométrica no SGeMS



Fonte: Elaborado pela autora.

Em relação aos histogramas podem ser evidenciadas algumas características importantes, tais como:

- Em 2013, ano de padrão habitual, pela krigagem é possível diagnosticar que o pico de sua frequência deu-se entre 90 a 100 milímetros, pela simulação o pico atingiu um pouco acima dos 100 milímetros.
- Em 2014, ano de padrão seco, pela distribuição de barras do histograma da krigagem é possível identificar mais que um único pico, nestes as maiores frequências são observadas entre 90 a 120 milímetros, ainda no histograma da krigagem é importante enfatizar que a média e a mediana, estiveram bem próximas, logo, do ponto de vista estatístico a distribuição pode ser considerada como normal. O histograma referente a simulação possui dois picos bem próximos, estes compreendem as precipitações de 70 a 120 milímetros.

- Em 2015, o histograma da krigagem apresenta a maior frequência nas precipitações de 80 a 100 milímetros, entretanto, diferentemente do ano padrão habitual e do seco, as barras do histograma desse ano caracterizado como chuvoso ficou direcionada pouco mais a direita, isso reflete que os postos pluviométricos apresentaram índices mais significativos. Pela simulação, as frequências estiveram mais baixas, pois a distribuição foi mais uniforme. Vale ressaltar que as variâncias desse ano estavam elevadas, tanto para krigagem quanto para simulação.

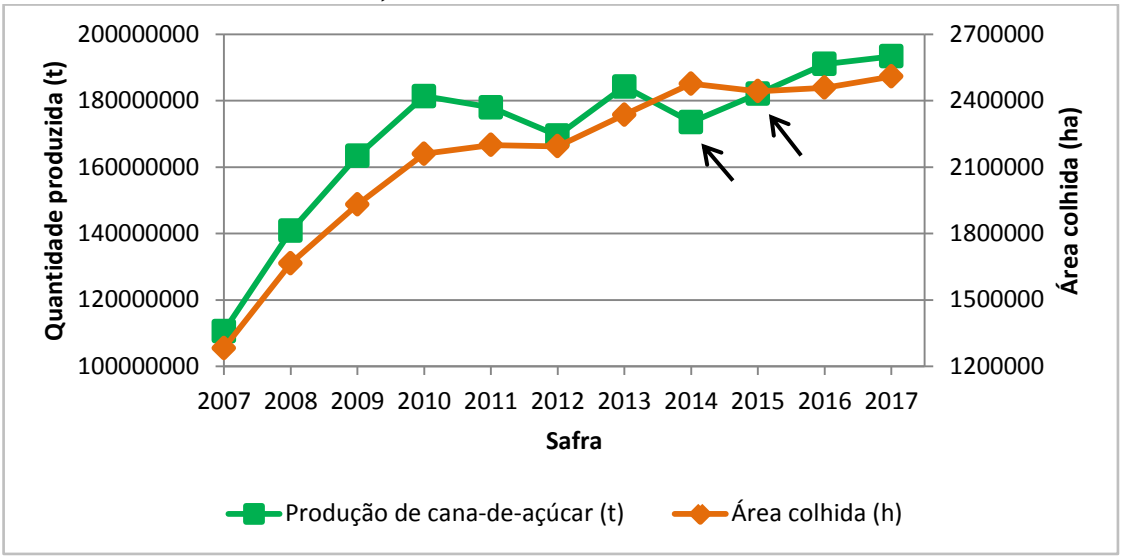
4.7 Análise associativa entre a precipitação pluviométrica e a produtividade da cana-de-açúcar

Considerando os sistemas de plantio e os estádios fenológicos da cana-de-açúcar destacados na fundamentação teórica. Como não foram encontrados dados municipais mensais da cana-de-açúcar e nem mesmo nenhuma outra informação acerca dos canaviais no IBGE, realizamos uma análise baseada nos monitoramentos agrometeorológicos efetuados pela Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), em que as fases de desenvolvimento e colheita são definidas a partir do calendário de colheita mensal de cada estado. Em relação a São Paulo, geralmente o período de desenvolvimento inicia-se no mês de maio e se estende até março/abril do ano seguinte.

Neste trabalho apresentamos as safras de 2014 e 2015, na primeira, o período de desenvolvimento compreende os meses de maio de 2013 a abril de 2014, e a segunda compreende os meses de maio de 2014 a abril de 2015 (ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA [DE] CANA-DE-AÇÚCAR, 2015, 2016).

A Figura 31 apresenta a quantidade produzida e a área colhida anual de toda a série temporal da pesquisa (2007 a 2017), podemos destacar que a safra de 2014 foi a única que teve sua produção inferior a sua área colhida. A de 2015 teve uma considerável melhora em relação a safra anterior, porém a produção é ainda reduzida comparada com as demais safras. É observada que área colhida de 2015 e 2016 foi praticamente a mesma, entretanto a produção da cana não acompanhou os mesmos ritmos, um dos fatores que podem ter contribuído na alta produtividade da safra de 2016, pode ser fruto dos elevados índices pluviométricos na estação da primavera de 2015.

Figura 31 - Relação entre a produção e a área colhida da cana-de-açúcar no período de 2007 a 2017, no oeste do estado de São Paulo

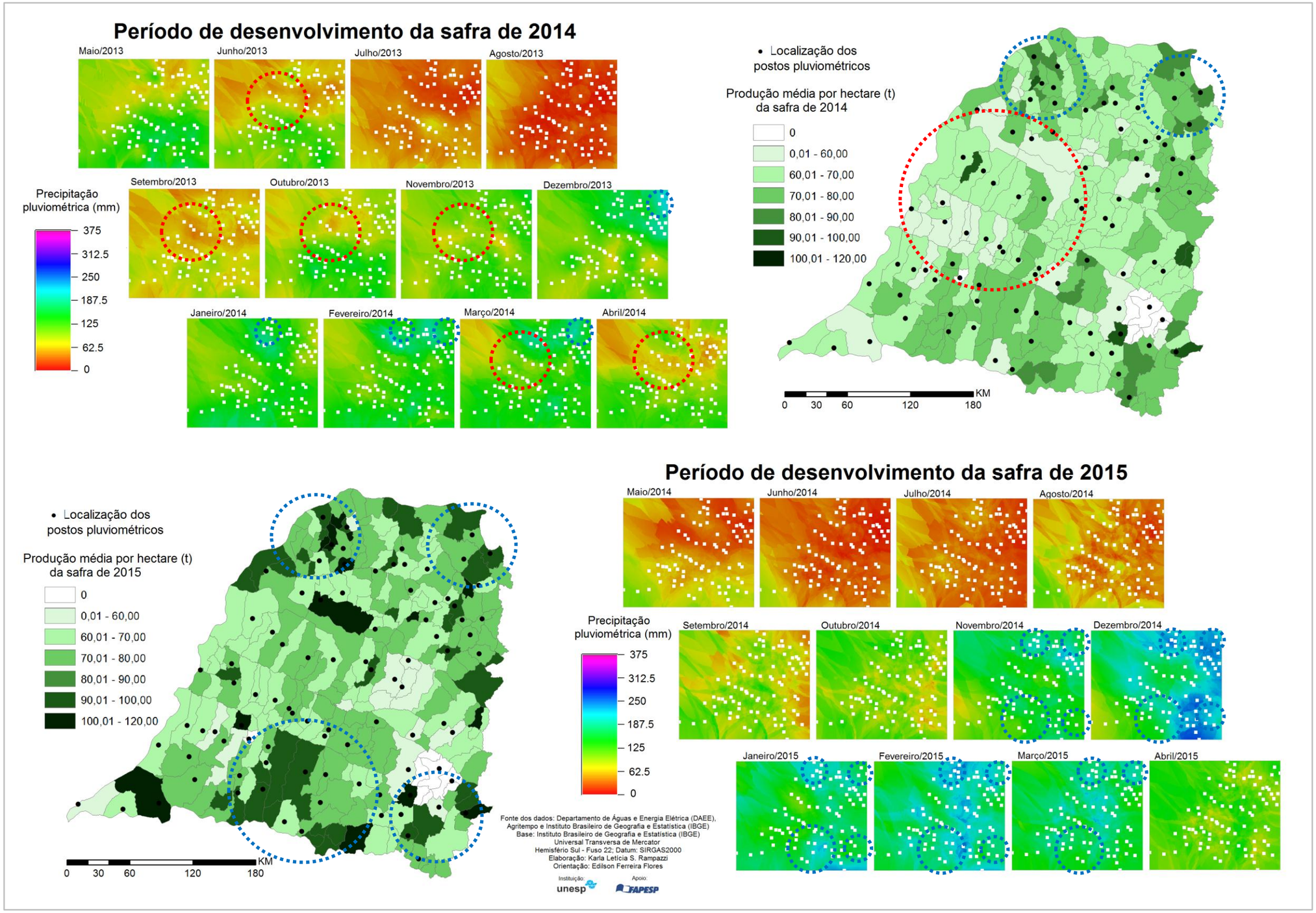


Fonte: Elaborado pela autora.

A partir da Figura 32, é possível indicar que a safra de 2014 foi prejudicada pela ausência de precipitações pluviométricas significativas, principalmente nos meses que referem-se a primavera de 2013 e ao verão de 2014. As médias da produtividade dessa safra ilustram o impacto que essa estiagem provocou, esses dados podem ser visualizados, especificamente no mapa de rendimento médio por hectare também representado pela Figura 32. A maior parte dos municípios do oeste do estado de São Paulo tiveram produções que variaram de 60 a 80 toneladas por hectare, no entanto, muitos deles tiveram produções abaixo de 60 toneladas. Alguns municípios dispersos apresentaram produções de 80 a 100 toneladas por hectare. Nessa safra em específico nenhum município da área de estudo obteve rendimento médio acima de 100 toneladas por hectare.

Ainda na Figura 32, em relação a safra de 2015, pode-se apontar que mesmo havendo índices relativamente baixos entre maio e agosto de 2014, as mesmas estações citadas anteriormente (primavera e verão) tiveram precipitações acima daquelas vistas para safra de 2014, essa condição favoreceu um melhor desenvolvimento para a cultura canavieira e, consequentemente, um aumento na produtividade. Assim como na safra anterior, destacaram-se produções que variaram de 60 a 80 toneladas por hectare, porém uma quantidade considerável de municípios em toda área de estudo tiveram seus rendimentos médios variando de 90 a 120 toneladas por hectare, estes estão localizados principalmente a noroeste, nordeste, sul e sudeste, coincidentemente essas foram as áreas que apresentaram índices pluviométricos mais expressivos.

Figura 32 - Relação entre a distribuição mensal da precipitação pluviométrica e a produtividade da cana-de-açúcar, no oeste do estado de São Paulo



Fonte: Elaborado pela autora.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Análise de Agrupamento apoiada ao método hierárquico de Ward, realizada a partir dos dados mensais dos 90 postos pluviométricos, revelou-se eficiente, pois os resultados da pesquisa fazem jus aos anos padrão detectados, no entanto essa técnica executada com o acumulado mensal acabou direcionando muito os grupos de interesse aos anos secos.

Pelos painéis espaço-temporais da Krigagem Ordinária e da Simulação Gaussiana Sequencial, foi possível observar que a primeira técnica aplicada ocultou algumas áreas secas e úmidas, devido ao efeito de suavização das dispersões reais, que faz com que valores pequenos sejam superestimados e valores altos subestimados, em contrapartida, essas áreas foram ressaltadas pela simulação, isso acontece, pois a mesma gera caminhos aleatórios em torno das células, por esse motivo, seus resultados são considerados mais condizentes com a realidade. Entretanto, as variâncias examinadas nos histogramas revelam que a krigagem comparada com a simulação obteve resultados mais satisfatórios.

Em relação a variação temporal das chuvas dos anos representativos, constatou-se que em 2013, ano esse considerado de padrão habitual, que os meses mais chuvosos concentraram-se na estação do verão. Em 2014, definido como de padrão seco, verificou-se, um período que compreende os meses de maio a agosto como sendo o mais seco, dentre os três anos padrão aqui analisados. Já em relação a 2015, ano esse de padrão chuvoso, foi possível diagnosticar que no verão e na primavera a maior parte da área de estudo foi contemplada com índices expressivos, principalmente a primavera que foi o período mais úmido dentre os três anos representativos. Assim, é possível designar que a ocorrência do período chuvoso para o oeste do estado de São Paulo deu-se de outubro a março (verão e primavera), e o período mais seco compreendeu aos meses de abril a setembro (outono e inverno), acentuando-se entre maio/junho a agosto.

Já em relação a distribuição espacial, podemos destacar que na estação do verão e da primavera, as áreas mais úmidas estavam situadas a norte, esses volumes podem estar associados a atuação das massas equatoriais e tropicais e das correntes de perturbações frontais, já aquelas mais secas predominaram entre oeste-sudoeste, com exceção da estação da primavera de 2015. Em relação as estações do outono e do inverno as porções mais úmidas ficaram mais concentradas na orientação sul, isso acontece pois a atuação da massa polar nesta porção do território paulista, neste período do ano fica mais intensa, e as áreas mais

secas ficaram restritas ao norte, pois as ondas de oeste e noroeste impendem em vários episódios a penetração do ar polar na porção setentrional (SANT'ANNA NETO, 1995).

As análises obtidas neste estudo evidenciam que, mesmo que haja inúmeros fatores que contribuem na produtividade da cana-de-açúcar, as variações pluviométricas apresentam-se ainda como fator preponderante, pois verificou-se que as chuvas escassas principalmente no verão e na primavera, prejudicaram consideravelmente todo o ciclo de desenvolvimento vegetativo da cultura e, consequentemente, do rendimento médio por hectare.

Este estudo demonstrou que a geoestatística vinculada ao geoprocessamento, quando aliadas e manipuladas adequadamente, fornecem uma gama de possibilidades de técnicas de análise espacial, mesmo que seu uso ainda seja rarefeito nas ciências humanas, os resultados reproduzem boas estimativas, assim, como qualquer outra técnica elas também possuem limitações e graus de incerteza.

Ao longo do desenvolvimento da pesquisa, algumas lacunas se fizeram presentes. Dentre elas, está a constatação de anisotropia em algumas direções dos semivariogramas, desse modo, para que os resultados reproduzissem de maneira ainda mais fiel a realidade, se faz necessário a modelagem daqueles direcionais. Além disso, seria interessante analisar outras variáveis que atreladas à precipitação pluviométrica influenciam diretamente na produtividade da cana-de-açúcar como: temperatura, radiação solar, utilização dos sistemas de irrigação entre outras.

REFERÊNCIAS

ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA [DE] CANA-DE-AÇÚCAR. Brasília: Conab, v. 1, n. 4, abr. 2015. Boletim quadrimestral. Quarto levantamento, safra 2014/15. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana?view=default. Acesso em: 27 nov. 2020.

ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA [DE] CANA-DE-AÇÚCAR. Brasília: Conab, v. 1, n. 4, abr. 2016. Boletim quadrimestral. Quarto levantamento, safra 2015/16. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana?view=default. Acesso em: 27 nov. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Levantamento da cana-de-açúcar irrigada na Região Centro-Sul do Brasil**. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: https://www.ana.gov.br/noticias-antigas/agaancia-nacional-de-aguas-mapeia-a-reairrigada.2019-03-15.4989989374. Acesso em: 5 mar. 2020.

AGRICULTURA no contexto da mudança do clima. [Plataforma] Adaptaclima,[2018?]. Disponível em: http://adaptaclima.mma.gov.br/agricultura-no-contexto-da-mudanca-de-clima. Acesso em: 20 jan. 2021.

AGRITEMPO. Sistema de Monitoramento Agrometeorológico. Banco de dados pluviométricos. Disponível em: https://www.agritempo.gov.br/agritempo/jsp/Estatisticas/index.jsp?siglaUF=SP. Acesso em: 5 abr. 2019.

BISQUEIRA, R.; SARRIERA, J. C.; MARTÍNEZ, F. **Introdução à estatística**: enfoque informático com o pacote estatístico SPSS. Porto Alegre: Artmed, 2004.

BOIN, M. N. **Chuvas e Erosões no Oeste Paulista**: Uma Análise Climatológica Aplicada. 2000. 264 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.

CÂMARA, G.; CASANOVA, M. A.; HEMERLY, A. S.; MAGALHÃES, G. C.; MEDEIROS, C. M. B. **Anatomia de sistemas de informação geográfica**. Campinas: Instituto de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/anatomia.pdf. Acesso em: 27 fev. 2020.

CÂMARA, G.; DAVIS, C. Introdução. *In*: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (ed. org.). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. cap. 1, p. 1-5. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/. Acesso em: 23 fev. 2020.

CÂMARA, G.; QUEIROZ, G. R. Arquitetura de sistemas de informação geográfica. *In*: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (ed. org.). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. cap. 3, p. 1-12. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/. Acesso em: 23 fev. 2020.

CAMARGO, E. C. G. **Desenvolvimento, implementação e teste de procedimentos geoestatísticos (Krigeagem) no Sistema de Processamento de Informações**

Georreferenciadas (SPRING). 1997. 148 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1997.

CAMARGO, E. C. G.; FUCKS, S. D.; CÂMARA, G. Análise espacial de superfícies. *In*: DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. V. M. (ed.). **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2004. cap. 3. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/index.html. Acesso em: 27 nov. 2020.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C. Zona de convergência do Atlântico Sul. *In*: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (org.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. cap. 6, p. 95-109.

CAVADO. In: GLOSSÁRIO de termos aplicados a meteorologia marinha. [S. l.: s. n.], [20--]. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/glossario_de_termos_aplicados_a_meteorologia_marinha1.pdf. Acesso em: 15 mar. 2020.

CHEAVEGATTI-GIANOTTO, A. *et al*. Sugarcane (Saccharum X officinarum): a reference study for the regulation of genetically modified cultivars in Brazil. **Tropical Plant Biology**, New York, v. 4, p. 62-89, 2011.

CORTELLA, M. S. **Mario Sergio Cortella**: faça o teu melhor. [*S.l.*], 24 set. 2018. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=dd1bsHYYqjg&feature=youtu.be. Acesso em: 08 fev. 2021.

DEUTSCH, C.V.; JOURNEL, A.G. **GSLIB**: Geostatistical Software Library and User's Guide. 2. ed. New York: Oxford University Press, 1997. Disponível em: http://claytonvdeutsch.com/wp-content/uploads/2019/03/GSLIB-Book-Second-Edition.pdf. Acesso em: 28 nov. 2020.

DIAS, M. A. F. S.; ROZANTE, J. R.; MACHADO, L. A. T. Complexos convectivos de mesoescala na América do Sul. *In*: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (org.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. cap. 12, p. 181-194.

EL NIÑO e La Niña. [Cachoeira Paulista]: CPTEC/INPE, [2016]. Disponível em: http://enos.cptec.inpe.br/. Acesso em: 15 mar. 2020.

FERNANDES, A. J. **Manual da cana-de-açúcar**. Piracicaba: Livroceres, 1984.

HAIR JR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. Tradução Adonai S. Sant'Anna. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção Agrícola Municipal – PAM. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas. Acesso em: 31 mar. 2020.

JÁCOMO, C. A. **Modelos geoestatísticos espaço-tempo aplicados a dados pluviométricos no oeste do Estado de São Paulo**. 2011. 109 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2011

MARIN, F. R. **Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira**: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos. 2014. 263 f. Tese (Livre docência em Agrometeorologia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

MARIN, F. R. Fenologia. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica (AGEITEC**). Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_68_22122006154840.html. Acesso em: 15 mar. 2020.

MARTINELLI, M. Clima do Estado de São Paulo. **Confins – Revue Franco-Brésilienne de Géographie**, São Paulo, n. 8, 2010. 1 mapa, color. Disponível em: https://journals.openedition.org/confins/docannexe/image/6348/img-11.jpg. Acesso em: 15 mar. 2020.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia**: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

MONTEIRO, C. A. F. **A dinâmica climática e as chuvas no Estado de São Paulo**: estudo geográfico sob forma de atlas. São Paulo: Universidade de São Paulo, Instituto de Geografia, 1973.

OLEA, R. A. **Geostatistics for engineers and earth scientists**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.

OLEA, R. A. **Optimum mapping techniques using regionalized variable theory**. Kansas: Kansas Geological Survey, 1975. (Series on Spatial Analysis, 2).

PERFIL DO SETOR DO AÇÚCAR E DO ETANOL NO BRASIL. Brasília: Conab, v.1, 2019. Anual. Edição para a safra 2015/16. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana?view=default. Acesso em: 27 nov. 2020.

RODRIGUES, M. Introdução ao geoprocessamento. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO, 1990, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1990. p. 1-26.

SACRAMENTO NETO, O. B.; ESCOBAR, G. C. J.; SILVA, P. E. D. Método objetivo para identificar episódios de Zonas de Convergência de Umidade (ZCOU) no ambiente operacional do Centro de Previsão de Tempo e Estados Climáticos – CPTEC. *In*: CONGRESSO DE METEOROLOGIA, 2010, Belém. **Anais** [...]. Belém: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2010. Disponível em: http://www.dca.iag.usp.br/material/ritaynoue/aca-0523/2014_1oS_SIN2/ZCASeZCOU_SacramentoNeto.pdf. Acesso em: 18 nov. 2020.

SANT'ANNA NETO, J. L. **As chuvas no Estado de São Paulo**: contribuição ao estudo da variabilidade e tendência da pluviosidade na perspectiva da análise geográfica. 1995. 252 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

SANTOS, M. J. Z. **Influências climáticas associadas às pedológicas e econômicas na produção de cana-de-açúcar nos núcleos do estado de São Paulo**. 1981. 411 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1981.

SÃO PAULO (Estado). Departamento de Águas e Energia Elétrica. Banco de dados pluviométricos. Disponível em: http://www.hidrologia.daee.sp.gov.br/. Acesso em: 12 abr. 2019.

SILVA, J. P. N.; SILVA, M. R. N. **Noções da cultura da cana-de-açúcar**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2012. Disponível em: https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/413/2018/12/06_nocoes_cultura_cana_acucar.pdf. Acesso em: 20 ago. 2020.

SILVESTRE, M. R.; SANT'ANNA NETO, J, L.; FLORES, E. F. Critérios estatísticos para definir anos padrão: uma contribuição à Climatologia Geográfica. **Revista Formação**, v. 2, n. 12, p. 23-53, 2013.

THOMAS, A. L. Desenvolvimento da planta de cana-de-açúcar. *In*: THOMAS, A. L. (org.). **Desenvolvimento das plantas de batata, mandioca, fumo e cana-de-açúcar**. Porto Alegre: UFRGS, 2016. p. 55-75. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/143809. Acesso em: 15 mar. 2020.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística**: conceitos e aplicações. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

APÊNDICE A – Informações complementares

- Localização dos postos pluviométricos

Tabela 3 - Localização dos postos pluviométricos

Posto Pluviométrico	Longitude	Latitude
Rosana	294260	7510463
Euclides da Cunha Paulista	337241	7505440
Teodoro Sampaio	371423	7511291
Presidente Epitácio	370966	7566645
Caiuá	398227	7585458
Marabá Paulista	400338	7555797
Mirante do Paranapanema	405630	7533689
Presidente Venceslau	413442	7580382
Piquerobi	424926	7579610
Santo Anastácio	433688	7570486
Pirapozinho	448538	7537580
Narandiba	446877	7520970
Taciba	470885	7524724
Indiana	474016	7550035
Rancharia	511501	7541074
Iepê	491490	7493386
Panorama	411141	7638575
Dracena	443242	7626082
Irapuru	463815	7615104
Emilianópolis	450476	7585583
Flórida Paulista	482629	7609632
Alfredo Marcondes	457487	7572475
Adamantina	495712	7601739
Caiabu	475969	7565319
Lucélia	498902	7597190
Osvaldo Cruz	513317	7589529
Bastos	529772	7575456
Iacri	533485	7581536
Quatá	530876	7538619
Lutécia	562867	7529636
Echaporã	582521	7519243
Marília	609879	7543275
Ocauçu	611536	7518815
Garça	639212	7544425
Monte Castelo	440931	7644521
Guaraçaí	480106	7674837
Mirandópolis	489524	7662978
Valparaíso	513885	7650187

Guararapes	538091	7648304
Queiroz	579299	7589122
Guaimbê	613897	7576243
Cafelândia	643812	7587287
Gália	651412	7532532
Guarantã	652117	7578814
Auriflama	546857	7712043
Nipoã	626575	7686604
Monte Aprazivel	635259	7702987
José Bonifácio	636730	7670688
Barbosa	609792	7647888
Andradina	460910	7687745
Coroados	574360	7638956
Penapólis	596772	7629614
Birigui	569207	7646357
Palmeira dOeste	524714	7742984
Urânia	536397	7758580
Jales	547438	7754557
Pontalinda	548759	7739736
Valentim Gentil	595702	7739476
Votuporanga	606424	7739536
Cosmorama	627895	7735054
Sebastianópolis do Sul	611970	7714719
Mirassol	653856	7699783
Santa Albertina	528230	7784509
Dolcinópolis	551066	7775112
Parisi	603704	7754495
Palestina	662786	7744505
Oriundiuva	670641	7767709
Icém	687753	7749817
Onda Verde	677197	7719359
Cedral	680329	7687402
Bady Bassitt	661245	7686305
Potirenbada	668932	7672174
Urupês	677342	7654094
Mendonça	647171	7656852
Campos Novos Paulista	602836	7500423
Ribeirão do Sul	609543	7480079
Platina	584186	7499645
Ourinhos	619634	7457859
Ubijara	638881	7507521
Paulistânia	664536	7501731
Pereira Barreto	473932	7733167
Buritama	578000	7677678

Santo Antônio do Aracanguá	526025	7705500
Paraguaçu Paulista	525713	7511806
Maracaí	507749	7484435
Tupã	551610	7567088
Sud Mennucci	508044	7712084
Avanhandava	603582	7622183
Magdá	578204	7733007
Balsamo	647555	7706728

Fonte: Elaborado pela autora.

- Preenchimento de falhas

A exemplo do preenchimento dos dados ausentes, utilizaremos o posto pluviométrico de Votuporanga (Figura 33). Tendo como apoio o mapa de localização dos postos pluviométricos (Figura 1), foi observado apenas dois mais próximos, o de Valentim Gentil e o de Parisi, neste a precipitação pluviométrica acumulada para o mês de julho em 2016 foi de 28,65 milímetros e naquele foi de 57,3 milímetros. Utilizando a média aritmética simples, função matemática dada em (17), obtivemos o volume mensal em milímetros da precipitação pluviométrica de Votuporanga:

$$\bar{X} = \frac{28{,}65 + 57{,}3}{2} = 42{,}97 \text{ milímetros.}$$

Figura 33 - Exemplo do preenchimento de falhas, demonstrativo do posto pluviométrico de Votuporanga

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	PREFIXO:	B6-036												
2	NOME DO	VOTUPORANGA												
3	MUNICÍPI	VOTUPORANGA												
4	CURSO D'/	CARVALHO OU CACHOEIRINHA,COR												
5	LATITUDE:	20°26'23"												
6	LONGITUI	49°58'49"												
7														
8	Obs: valores com --- representam dados inexistentes.													
9														
10	Chuva Mensal (mm)													
11														
12	Ano	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	TOTAL
13	2007	708.9	227.5	136.7	11.9	94.2	0	64.7	0	0	52.5	76.9	137.7	1511
14	2008	531.8	329.5	116	118.3	55.1	1.7	0	18.7	5.7	108.8	58.1	184.5	1528.2
15	2009	275.2	255.4	220.1	45.1	40	17.4	17.8	73.9	176.3	106.9	152.3	384.3	1764.7
16	2010	381.4	100	66.9	32.9	15.5	17.8	1.8	0	95.7	130.7	76.4	105.7	1024.8
17	2011	334.8	322	450.2	61.7	8.9	35.1	0	21.9	8.4	84.4	93	143	1563.4
18	2012	429.1	118.1	49.1	127.9	86.9	185	12.1	0	88.6	20.7	177.6	304.8	1599.9
19	2013	245.6	161.7	164	34.6	56.4	67.9	39	0	78.2	73.6	123.4	185	1229.4
20	2014	77.7	169.6	246.5	16.1	21.2	2.5	50.4	0	92.7	37.5	290.1	182.8	1187.1
21	2015	196.9	187.7	193.7	28.6	73.9	15	55.3	6.8	130.2	172.8	279.7	210	1550.6
22	2016	466.4	206.4	231.1	69.3	92.3	76.7	42.97	41.6	14.3	104.8	119.4	249.36	1714.63
23	2017	363	99.6	106.1	63.4	107.3	4.2	0	19.6	10.4	98.3	229.4	296.56	1397.86
24														

Jales | Pontalinda | Valentim Gentil | **Votuporanga** | Cosmorama | Sebastia

Fonte: Elaborado pela autora.

- Parâmetros e semivariogramas da precipitação pluviométrica sazonal 2013 e 2014

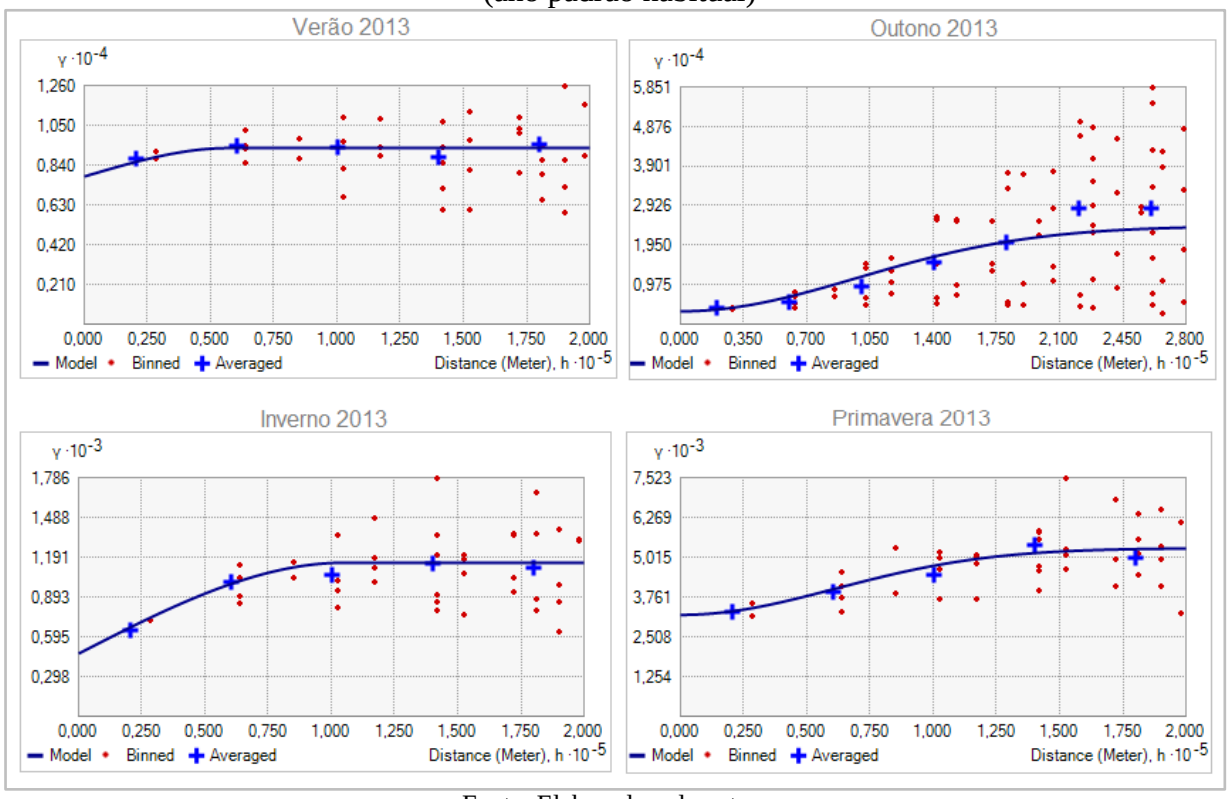
Os parâmetros dos semivariogramas omnidirecionais de 2013 estão descritos na Tabela 4 e os semivariogramas correspondentes estão ilustrados na Figura 34. Dentre as estações desse ano em questão, a do outono foi aquela que apresentou a dependência espacial mais alta (240000 metros), em contrapartida a estação do verão obteve a menor dependência espacial, cerca de 57000 metros, isso reflete que em pequenas distâncias as amostras variaram muito, esse raio de influência pode estar associado as chuvas de verão, que são caracterizadas por distribuições isoladas. A estação do inverno teve dependência espacial pouco acima dos 100000 metros e a da primavera esteve em cerca de 150000 metros. No verão e no inverno o modelo ajustado foi o esférico, já no outono e na primavera foi o gaussiano.

Tabela 4 - Parâmetros dos semivariogramas omnidirecionais da precipitação pluviométrica sazonal de 2013 (ano padrão habitual)

PARÂMETROS	**VERÃO 2013**	**OUTONO 2013**	**INVERNO 2013**	**PRIMAVERA 2013**
Modelo	Esférico	Gaussiano	Esférico	Gaussiano
Efeito Pepita/Nugget (C_0)	7800	3200	470	3200
Alcance/ Range(α)	57000	240000	105000	150000
Contribuição/Sill (C_1)	1500	21000	680	2100
Patamar (C)	9300	24200	1150	5300
Número de Lags	5	7	5	5
Separação dos Lags	40000	40000	40000	40000

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 34 - Semivariogramas omnidirecionais da precipitação pluviométrica sazonal de 2013 (ano padrão habitual)



Fonte: Elaborado pela autora.

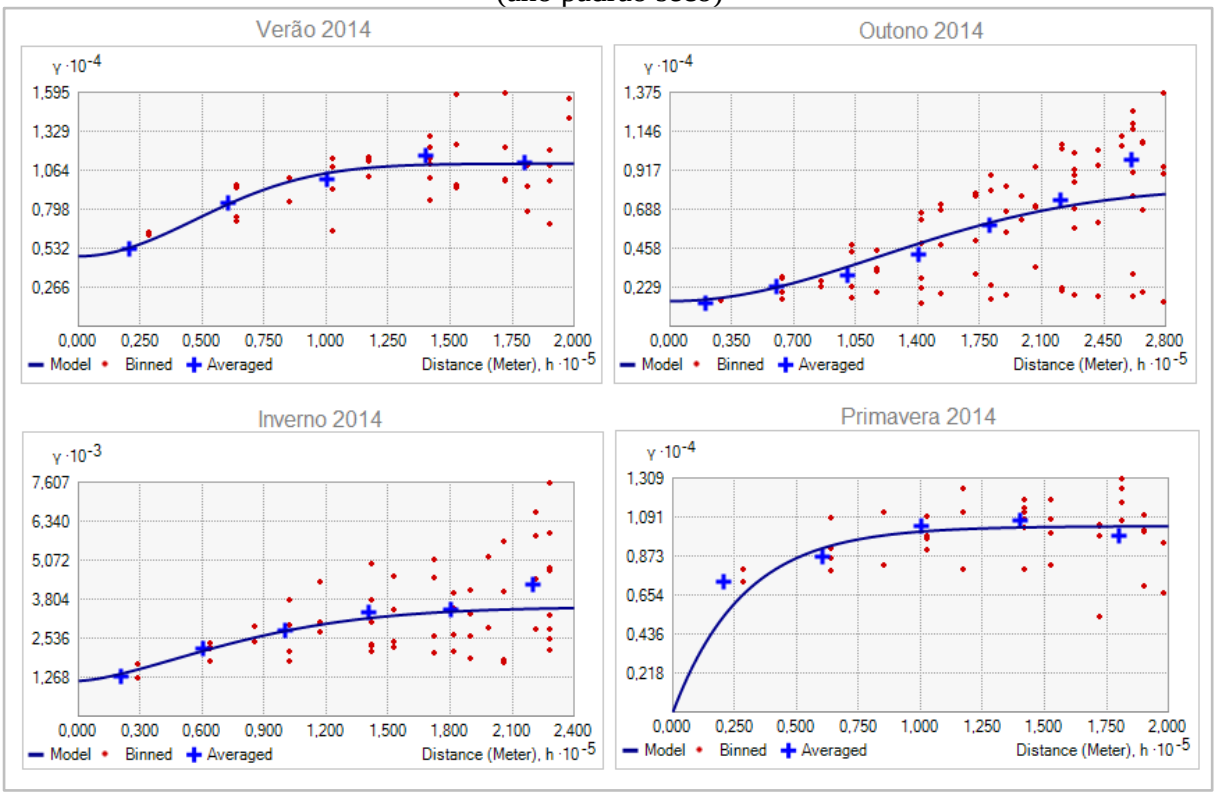
Os parâmetros dos semivariogramas omnidirecionais de 2014 estão descritos na Tabela 5 e os semivariogramas podem ser visualizados na Figura 35. A partir de uma análise preliminar é possível destacar que assim como no ano anterior, o outono foi a estação que obteve a maior dependência espacial, cerca de 290000 metros, a primavera apresentou Efeito Pepita puro, isso designa que não existe dependência espacial, visto que, os postos pluviométricos próximos apresentaram índices muito discrepantes. A estação do verão por sua vez teve dependência espacial acima dos 115000 metros e a do inverno alcançou os 180000 metros. O verão, outono e o inverno foram ajustados no modelo gaussiano, na primavera aquele que mais se adaptou foi o exponencial.

Tabela 5 - Parâmetros dos semivariogramas omnidirecionais da precipitação pluviométrica sazonal de 2014 (ano padrão seco)

PARÂMETROS	**VERÃO 2014**	**OUTONO 2014**	**INVERNO 2014**	**PRIMAVERA 2014**
Modelo	Gaussiano	Gaussiano	Gaussiano	Exponencial
Efeito Pepita/Nugget (C_0)	4781	1480	1150	0
Alcance/ Range (α)	115000	290000	180000	85000
Contribuição/ Sill (C_1)	6310	6704,3	2800	10400
Patamar (C)	11091	8184,3	3950	10400
Número de Lags	5	7	6	5
Separação dos Lags	40000	40000	40000	40000

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 35 - Semivariogramas omnidirecionais da precipitação pluviométrica sazonal de 2014 (ano padrão seco)



Fonte: Elaborado pela autora.