



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
CURSO DE MESTRADO EM METEOROLOGIA**

**RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL MENSAL PARA O ESTADO DE
ALAGOAS - MAPEAMENTO**

PAULO RICARDO TEIXEIRA DA SILVA

**MACEIÓ - AL
Fevereiro/2007**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
CURSO DE MESTRADO EM METEOROLOGIA**

**RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL MENSAL PARA O ESTADO DE
ALAGOAS - MAPEAMENTO**

PAULO RICARDO TEIXEIRA DA SILVA

Dissertação submetida ao corpo docente da
Coordenação do Programa de Pós-graduação
em Meteorologia da Universidade Federal
de Alagoas como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Mestre em Meteorologia.

Orientador: **Prof. Dr. José Leonaldo de Souza**

MACEIÓ - AL

Fevereiro/2007

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale

- S586v Silva, Paulo Ricardo Teixeira da.
 Radiação Solar Global Mensal para o Estado de Alagoas - Mapeamento /
 Paulo Ricardo Teixeira da Silva. – Maceió, 2007.
 xvii, 93f. : il., grafs., tabs.
- Orientador: José Leonaldo de Souza.
 Dissertação (mestrado em Meteorologia : Processos de Superfície Terrestre) –
 Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió,
 2007.
- Bibliografia: f. [55]-61.
 Apêndices: f. [62]-93.
1. Meteorologia. 2. Radiação solar. 3. Variabilidade espacial – Alagoas.
 4. Geoestatística. I. Título.

CDU: 551.521.1(813.5)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
CURSO DE MESTRADO EM METEOROLOGIA**

CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

**TÍTULO: RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL MENSAL PARA O ESTADO DE
ALAGOAS - MAPEAMENTO**

PAULO RICARDO TEIXEIRA DA SILVA

Dissertação submetida ao corpo docente da
Coordenação do Programa de Pós-graduação em
Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovado pela banca examinadora composta por:

Prof. Dr. José Leonaldo de Souza
(Orientador)

Prof. Dr. Chigueru Tiba

Dr. Gustavo Bastos Lyra

**MACEIÓ - AL
Fevereiro/2007**

DEDICATÓRIA

À minha família e à minha amiga, companheira e noiva Marta de Oliveira Sá, que sempre me apoiaram, dando condições para que eu pudesse vencer mais essa batalha. Pelos sacrifícios que todos vocês fizeram por mim, para que eu pudesse continuar na luta.

Foram vocês, com paciência, disponibilidade e amor, os principais responsáveis por mais esta etapa vencida.

Por vocês e para vocês dedico.

A todos que me apoiaram, mas principalmente
para aqueles que um dia duvidaram que eu
teria competência e força para
ultrapassar mais essa etapa

Ofereço

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo. Por me dar força e oportunidades, em todos os momentos da minha vida, me permitindo lutar na esperança de um futuro melhor.

Aos meus pais Sarai Teixeira da Silva e Genildo Alves da Silva, exemplo de verdadeiros pais e amigos, que reflete todo o amor de Deus para com os seus filhos, simplesmente o verdadeiro amor, a mim dedicado com compreensão e incentivo que fizeram que eu tivesse a oportunidade de chegar até aqui.

Ao professor Dr. José Leonaldo de Souza, que aceitou me orientar neste trabalho; e por ter contribuído com suas sugestões para melhoria do mesmo, além de paciência e compreensão, me dando oportunidade de terminar este trabalho.

Aos Drs Chigueru Tiba e Gustavo Bastos Lyra que aceitaram fazer parte da minha banca examinadora, além de ajudarem dando-me atenção e sugestões para a melhoria deste trabalho.

Ao professor Dr. Frede Carvalho de Oliveira, que me ajudou de certa forma neste trabalho, dando-me atenção, apoio e infra-estrutura para a realização do mesmo, sempre muito prestativo nos momentos em que eu precisei.

Ao grande amor da minha vida, minha noiva Marta de Oliveira Sá, pela imensa contribuição, por toda a sua atenção e disposição nos momentos em que mais precisei, mesmo que em alguns momentos isso tivesse que acontecer a distância. Por ser peça fundamental para a minha vida neste momento importante e nos momentos futuros. Também, à sua família, (minha sogra D. Mércia Heloísa e a filhinha e princesinha que ganhei Ana Heloísa) pessoas tão gentis, acolhedoras e divertidas.

A todos aqueles professores do Curso de Mestrado em Meteorologia, que me transmitiram conhecimentos; a alguns que me acompanharam desde a Graduação e me compreenderam nos momentos de dificuldades pessoais, preocupando-se com o meu aprendizado.

Aos caros amigos: Solange, Anna Laura, Éricka, Glauber, Mozart, Thiago Veloso, Zezinho, Erisson, Erickson e Joaquim entre outros, pelos momentos de alegrias e tristezas em

nossas convivências juntos, superando tantas dificuldades. Em especial à Solange, Anna Laura e Thiago Veloso pela amizade nascida de uma boa convivência.

Aos Amigos do PMGCA – Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-Açúcar de Alagoas, onde aprendi muita coisa durante os seis anos de convivência.

À D. Ana, por contribuir de maneira indireta na minha vida, com apoio, acolhida e compreensão, tanto na minha vida como na vida da Marta.

A todos os amigos e colegas do curso de meteorologia (mestrado e graduação), pela força nos momentos de precisão e convivência durante o período de estudos.

E a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

PENSAMENTO

*O meu desejo é profundo demais pra falar
E o que eu penso é difícil de alguém entender
A vida segue e os dias parecem iguais
Cadê a vida que perdemos sempre ao viver?*

*Há crianças pelas ruas
Há desertos de dor
Há uma forma em cada alma
Um intenso rancor*

*Tantos medos nas esquinas
uma grande prisão
Tantos sonhos esquecidos
um vazio que vive no coração*

*O meu desejo é profundo demais pra expor
E o que eu penso é difícil de alguém aceitar
A vida seque e os dias não são tão iguais
Cadê a vida que não conseguimos notar?*

*Onde mora a verdade?
Onde mora o amor?
Onde vive a liberdade?
Diz qual é seu sabor*

*Você anda pela ruas
sem respostas enfim
Mas a fé que eu tenho em Deus
Me faz ver o que sou, nunca fugir de mim*

*O meu desejo é intenso demais pra falar
Mas hoje eu grito e o que acredito eu vou levar
Para onde for, no dia a dia
Todo dia esse grande amor eu vou levar*

SUMÁRIO

RESUMO	x
ABSTRACT	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xvi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xvii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 RADIAÇÃO SOLAR.....	3
2.2 ESTIMATIVA PONTUAL DA RADIAÇÃO SOLAR.....	4
2.3 ESTIMATIVA ESPACIAL DA RADIAÇÃO SOLAR.....	5
2.4 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS.....	6
2.4.1 - A ANÁLISE ESTRUTURAL OU O ESTUDO VARIOGRÁFICO.....	8
2.5 GEOESTATÍSTICA COMO MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO DOS DADOS.....	10
2.5.1 – GEOESTATISTICA CLÁSSICA	10
2.5.2 – GEOESTATISTICA MODERNA (MÁXIMA ENTROPIA BAYESIANA)	12
2.6 VALIDAÇÃO CRUZADA	13
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	15
3.1 MATERIAL	15
3.1.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	15
3.1.2 TRATAMENTO DOS DADOS.....	16
3.2 MÉTODOS	20
3.2.1 ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL	20
3.2.2 ESTIMATIVA ESPACIAL	22
3.2.3 CALCULO DA DEPENDÊNCIA ESPACIAL.....	24
3.2.3 VALIDAÇÃO CRUZADA DOS DADOS INTERPOLADOS	25
3.3 EQUIPAMENTOS E SOFTWARES UTILIZADOS.....	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
4.1 ANÁLISE DO MODELO E ALLEN (1997), ORIGINAL, E O MODELO DE ALLEN MODIFICADO POR NICÁCIO (2002) PARA MACEIÓ-AL.....	27
4.2 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA DOS VARIOGRAMAS	31

4.3 ANÁLISE ESPACIAL DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL	39
5 CONCLUSÕES	53
6 RECOMENDAÇÕES	54
REFERÊNCIAS	55
APÊNDICES	62
APÊNDICE A – CONCEITOS ESTATÍSTICOS BÁSICOS	63
APÊNDICE B - COEFICIENTE DO MODELO PARA ESTIMATIVA DAS TEMPERATURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS MÉDIAS MENSIS DO ESTADO DE ALAGOAS.....	66
APÊNDICE C - ESPACIALIZAÇÃO DAS TEMPERATURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS MÉDIAS MENSIS DO ESTADO DE ALAGOAS	69

RESUMO

TEIXEIRA-SILVA, Paulo Ricardo. **Radiação Solar Global mensal para o Estado de Alagoas - Mapeamento**. Orientador: Prof. Dr. José Leonaldo de Souza, Maceió-AL: UFAL, 2007. Dissertação (Mestrado em Meteorologia)

Este trabalho apresenta um estudo sobre a variabilidade espacial da radiação solar global mensal no Estado de Alagoas, estimada em função da temperatura do ar e da pressão atmosférica. Foi utilizado o modelo proposto por Allen (1997) com os coeficientes encontrados na literatura e no trabalho de Nicácio (2002), já que este último foi parametrizado para a mesma região de estudo. O objetivo principal deste trabalho foi verificar qual das parametrizações melhor se ajustava às condições de amplitude térmicas locais. O modelo de Allen (1997) foi adotado, por não existir uma rede densa de medidas de brilho solar, ao contrário das medidas de temperatura do ar, que são encontradas com maior facilidade. Em primeira análise, constatou-se que o modelo de Allen (1997) modificado por Nicácio (2002), não apresentou boa concordância para os pontos das regiões da Zona da Mata, Agreste e Sertão Alagoano, podendo assim só ser aplicado para a região do Litoral. Diante deste primeiro resultado foi utilizado o modelo de Allen (1997) contido na literatura para essas regiões. Depois de se obter o resultado do melhor modelo para cada região, foram elaborados mapas de radiação solar global, realizando estudos da variabilidade espacial e aplicando técnicas geoestatísticas para interpolação, criando assim um Atlas Solarimétrico do Estado.

Palavras-Chave: Radiação Solar, Variabilidade espacial – Alagoas, Geoestatística.

ABSTRACT

TEIXEIRA-SILVA, Paulo Ricardo. Global Solar Radiation monthly to the State of Alagoas - Mapping, Adviser: Prof. Dr. José Leonaldo de Souza, Maceió-AL: UFAL, 2007. Dissertation (Master in Meteorology)

This paper show a study on the spatial variability of global solar radiation monthly in the state of Alagoas, estimated as a function of the air temperature and atmospheric pressure. Was used the model proposed by Allen (1997) with the coefficients in the literature and the work of Nicácio (2002), since the latter was parametrized to the area of study. The aim of this study was to verify which of parameterizations was better adjusted to the conditions of local thermal amplitude. The Allen model (1997) was adopted, for not exist a dense network of measures solar brightness, as opposed to the measures of air temperature, which are found more easily. In the first analysis, it was checked that the Allen model (1997) modified by Nicácio (2002), did't show good agreement for points of the regions of the Zona da Mata, Agreste and Sertão Alagoano and may well only be applied to the region of Litoral. Before this first result was used Allen model (1997) contained in the literature for these regions. After obtaining the result of the best model for each region, maps were developed for global solar radiation, conducting studies of the spatial variability and applying techniques geoestatísticas for interpolation, thus creating a Solarimetric Atlas of the State.

Key-words: Solar Radiation, Space variability – Alagoas, Geostatistic

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Caráter misto de uma estrutura aleatória, ou seja, uma distribuição heterogênea, de comportamento caótico.	7
Figura 2 – Forma gráfica típica do semivariograma ($\gamma(h)$ em função de h).....	9
Figura 3 – Mapa do estado de Alagoas com sua localização no nordeste e suas mesoregiões.	15
Figura 4 – Localização e distribuição geográfica dos 102 municípios do Estado de Alagoas.	18
Figura 5 – Fluxograma da metodologia aplicada e do acoplamento das sub-rotinas utilizadas	26
Figura 6 – Distribuição da Pressão Atmosférica (kPa) e do coeficiente de ajuste (Kr) para as 102 localidades do estado de Alagoas, calculado pelo método de Allen(1995) e modificado por Nicácio (2002).	28
Figura 7 – Distribuição Espacial do coeficiente empírico Kr para o estado de Alagoas.	29
Figura 8 – Variação media mensal da radiação solar global observada no período de 1997-2003 os valores estimados pelos métodos propostos por Allen, 1997, e Nicácio, 2002, para região de Maceió-AL.....	30
Figura 9 – Variação do erro médio absoluto entre os modelos, original e modificado e os dados observados.	31
Figura 10 – Modelo exponencial ajustado ao variograma da Radiação Solar Global para o mês de maio do estado de Alagoas.....	34
Figura 11 – Validação cruzada pelo método “Leave one Out”, correspondente ao melhor modelo variográfico ajustado da Radiação Solar Global, para o mês de maio do estado de Alagoas.....	35

Figura 12 – Validação cruzada pelo método “Double Kriging”, correspondente ao melhor modelo variográfico ajustado da Radiação Solar Global, para o mês de maio do estado de Alagoas.....	35
Figura 13 – Modelo exponencial ajustado ao variograma da Radiação Solar Global para o mês de novembro do estado de Alagoas.....	36
Figura 14 – Validação cruzada pelo método “Leave one Out”, correspondente ao melhor modelo variográfico ajustado da Radiação Solar Global, para o mês de novembro do estado de Alagoas.....	38
Figura 15 – Validação cruzada pelo método “Double Kriging”, correspondente ao melhor modelo variográfico ajustado da Radiação Solar Global, para o mês de novembro do estado de Alagoas.....	39
Figura 16 – Distribuição Espacial da Radiação Solar Global em MJm ⁻² correspondente ao mês de JANEIRO para o estado de Alagoas.....	41
Figura 17 – Distribuição Espacial da Radiação Solar Global em MJm ⁻² correspondente ao mês de FEVEREIRO para o estado de Alagoas.....	42
Figura 18 – Distribuição Espacial da Radiação Solar Global em MJm ⁻² correspondente ao mês de MARÇO para o estado de Alagoas.....	43
Figura 19 – Distribuição Espacial da Radiação Solar Global em MJm ⁻² correspondente ao mês de ABRIL para o estado de Alagoas.....	44
Figura 20 – Distribuição Espacial da Radiação Solar Global em MJm ⁻² correspondente ao mês de MAIO para o estado de Alagoas.....	45
Figura 21 – Distribuição Espacial da Radiação Solar Global em MJm ⁻² correspondente ao mês de JUNHO para o estado de Alagoas.....	46
Figura 22 – Distribuição Espacial da Radiação Solar Global em MJm ⁻² correspondente ao mês de JULHO para o estado de Alagoas.....	47
Figura 23 – Distribuição Espacial da Radiação Solar Global em MJm ⁻² correspondente ao mês de AGOSTO para o estado de Alagoas.....	48
Figura 24 – Distribuição Espacial da Radiação Solar Global em MJm ⁻² correspondente ao mês de SETEMBRO para o estado de Alagoas.....	49
Figura 25 – Distribuição Espacial da Radiação Solar Global em MJm ⁻² correspondente ao mês de OUTUBRO para o estado de Alagoas.....	50

Figura 26 – Distribuição Espacial da Radiação Solar Global em MJm ⁻² correspondente ao mês de NOVEMBRO para o estado de Alagoas.....	51
Figura 27 – Distribuição Espacial da Radiação Solar Global em MJm ⁻² correspondente ao mês de DEZEMBRO para o estado de Alagoas.....	52
Figura 28 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima media mensal (Tx) de JANEIRO em °C, para o estado de Alagoas.....	70
Figura 29 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima media mensal (Tx) de FEVEREIRO em °C, para o estado de Alagoas.....	71
Figura 30 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima media mensal (Tx) de MARÇO em °C, para o estado de Alagoas.....	72
Figura 31 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima media mensal (Tx) de ABRIL em °C, para o estado de Alagoas.....	73
Figura 32 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima media mensal (Tx) de MAIO em °C, para o estado de Alagoas.....	74
Figura 33 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima media mensal (Tx) de JUNHO em °C, para o estado de Alagoas.....	75
Figura 34 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima media mensal (Tx) de JULHO em °C, para o estado de Alagoas.....	76
Figura 35 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima media mensal (Tx) de AGOSTO em °C, para o estado de Alagoas.....	77
Figura 36 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima media mensal (Tx) de SETEMBRO em °C, para o estado de Alagoas.....	78
Figura 37 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima media mensal (Tx) de OUTUBRO em °C, para o estado de Alagoas.....	79
Figura 38 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima media mensal (Tx) de NOVEMBRO em °C, para o estado de Alagoas.....	80
Figura 39 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima media mensal (Tx) de DEZEMBRO em °C, para o estado de Alagoas.....	81
Figura 40 – Distribuição Espacial da Temperatura Mínima media mensal (Tn) de JANEIRO em °C, para o estado de Alagoas.....	82
Figura 41 – Distribuição Espacial da Temperatura Mínima media mensal (Tn) de FEVEREIRO em °C, para o estado de Alagoas.....	83

Figura 42 – Distribuição Espacial da Temperatura Mínima media mensal (Tn) de MARÇO em °C, para o estado de Alagoas.....	84
Figura 43 – Distribuição Espacial da Temperatura Mínima media mensal (Tn) de ABRIL em °C, para o estado de Alagoas.....	85
Figura 44 – Distribuição Espacial da Temperatura Mínima media mensal (Tn) de MAIO em °C, para o estado de Alagoas.....	86
Figura 45 – Distribuição Espacial da Temperatura Mínima media mensal (Tn) de JUNHO em °C, para o estado de Alagoas.....	87
Figura 46 – Distribuição Espacial da Temperatura Mínima media mensal (Tn) de JULHO em °C, para o estado de Alagoas.....	88
Figura 47 – Distribuição Espacial da Temperatura Mínima media mensal (Tn) de AGOSTO em °C, para o estado de Alagoas.....	89
Figura 48 – Distribuição Espacial da Temperatura Mínima media mensal (Tn) de SETEMBRO em °C, para o estado de Alagoas.....	90
Figura 49 – Distribuição Espacial da Temperatura Mínima media mensal (Tn) de OUTUBRO em °C, para o estado de Alagoas.....	91
Figura 50 – Distribuição Espacial da Temperatura Mínima media mensal (Tn) de NOVEMBRO em °C, para o estado de Alagoas.....	92
Figura 51 – Distribuição Espacial da Temperatura Mínima media mensal (Tn) de DEZEMBRO em °C, para o estado de Alagoas.....	93

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** – Resumo estatístico da radiação global (R_g) observada em MJm^{-2} para Maceió-AL, 1997 – 2003, e os resultados do modelo de Allen [original (1997) e modificado (Nicácio, 2002)], e seus respectivos erros médios absoluto ($\langle Z - Z^* \rangle$ onde $Z = R_g$ médio observado e $Z^* = R_g$ estimado).....32
- Tabela 2** – Parâmetros dos modelos teóricos ajustados ao variograma experimental normalizado da radiação solar global média para o mês de maio. (C_0 =Efeito Pepita, $C+C_0$ =Patamar, C =Variância Estrutural, a =Alcance, $\text{IDE}\%$ =Índice de Dependência Espacial).....33
- Tabela 3** – Parâmetros dos modelos teóricos ajustados ao variograma experimental normalizado da radiação solar global média para o mês de novembro. (C_0 =Efeito Pepita, $C+C_0$ =Patamar, C =Variância Estrutural, a =Alcance, $\text{IDE}(\%)$ =Índice de Dependência Espacial).....37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas
BME – Máxima Entropia Bayesiana (*Bayesian Máximum Entropy*)
CV – Coeficiente de Variação
ENE – Leste do Nordeste
FA – Função Aleatória
GIS – Sistema de Informação Geográfica
HN – Hemisfério Norte
HS - Hemisfério Sul
IDE – Índice de Dependência Espacial
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
Kt – Transmissância Atmosférica
KO – Krigagem Ordinária
n – Brilho Solar
N – Fotoperíodo
NE – Nordeste
NEB – Nordeste Brasileiro
OLADE – Organização Latino Americana de Energia
POA – Perturbações Ondulatórias dos Alísios
RBF – Função de Base Radial
Rg – Radiação Solar Global
Ro– Radiação no Topo da Atmosfera
VC – Validação Cruzada
VA – Variável Aleatória
VCAN – Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

1.0 INTRODUÇÃO

O conhecimento da intensidade da radiação solar tem aplicabilidades nas mais diversas áreas, seja na engenharia, meteorologia, agricultura entre outras. Porém, um dos principais enfoques da radiação solar atualmente é o seu aproveitamento para a produção alternativa de energia. O país como um todo dispõe de condições climatológicas favoráveis ao aproveitamento da radiação solar como fonte de energia, em especial, a região Nordeste, que possui um dia solar médio de aproximadamente 12 horas (Nicácio, 2002).

O estudo, tanto pontual como o espacial da radiação solar se mostra como um dos principais parâmetros de interesse para a sociedade, suas informações são de alta aplicabilidade em várias áreas de estudo, como agronomia, hidrologia, engenharias, e principalmente na captação de energia renovável e limpa. O significativo aumento no número de sistemas de eletricidade rural com tecnologia proveniente de painéis fotovoltaicos, torna de suma importância o conhecimento da radiação solar, em virtude do aumento da demanda energética e, principalmente, pela preocupação com a redução dos recursos naturais. Embora o aproveitamento da energia solar seja uma preocupação bastante antiga em todo o globo, só por meados das últimas décadas foi possível observar melhorias nas técnicas, tendo isso possibilitado uma melhor aplicação dos coletores solar, e outros componentes, que tornaram viável a utilização da radiação como energia, com um alto rendimento e a custos compatíveis com fontes de energia “convencionais”. No Brasil encontram-se dificuldades para obter dados da radiação solar, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) dispõe de 321 estações meteorológicas convencionais, dessas apenas 232 registram a duração do brilho solar e somente 58 locais (18,1%) registram a radiação solar por actinógrafos, e, raríssimos são as medidas piranométricas. Assim, ainda faz-se necessário estimar a radiação por meio de modelos empíricos baseados em elementos meteorológicos (Lima, 2005), principalmente quando se necessita da espacialização dessa variável.

Diante disto, existem no mundo, diversos estudos (Kimbal, 1919; Ångström, 1924; Prescott et al, 1940; Grossi, 1997; Allen et al, 1997; Suehrcke, 2000; Wong e Chow, 2001; Liu e Scott, 2001), com o objetivo de realizar a estimativa da radiação solar por meio de outras variáveis meteorológicas, seja ela pontual ou espacial. No estudo espacial da radiação, recentemente destaca-se o trabalho desenvolvido por Tiba et al. (1997, 2000), que com apoio da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) e Ministério de Minas e Energia, CEPEL/Eletróbrás produziram o Atlas Solarimétrico do Brasil.

Neste trabalho serão comentados, inicialmente, estudos que visam elaborar modelos pontuais e espaciais para estimativa da radiação solar global. Em seguida serão introduzidos conceitos básicos da geoestatística, como a análise da dependência espacial por meio do variograma e também de interpolação, utilizando a metodologia da Krigagem e da Máxima Entropia Bayesiana (BME).

OBJETIVO

Esta dissertação apresenta um estudo sobre a espacialização da radiação solar no Estado de Alagoas, utilizando uma metodologia mais adequada de estimativa de valores de radiação solar com dados de temperatura do ar. Os objetivos específicos são:

- Testar modelo de estimativa de radiação solar proposto por Allen (1997) na sua forma original e com seus coeficientes modificados (Nicácio, 2002) para Alagoas;
- Elaborar mapas mensais de radiação solar global para o estado de Alagoas, criando assim um Atlas Solarimétrico.

2.0 – REVISÃO DE LITERATURA

2.1 – RADIAÇÃO SOLAR

O conhecimento da intensidade da radiação solar tem aplicabilidade nas mais diversas áreas, seja na engenharia, meteorologia, agricultura entre outras. Porém, um dos principais enfoques da radiação solar atualmente é o seu aproveitamento para a produção alternativa de energia. No Brasil, cerca 93% do potencial energético é de origem hídrica, este fato está atribuindo ao elevado número de rios e o relevo acidentado. No entanto, o país como um todo dispõe de condições climatológicas favoráveis à utilização da radiação solar como fonte de energia, em especial, a região Nordeste, que possui um dia solar médio de aproximadamente 12 horas. Diante do potencial energético que pode ser produzido proveniente do Sol, muitos estudos sistemáticos tem sido realizados com a finalidade de possibilitar a utilização desta energia, porém ainda são poucos os trabalhos que tem como objetivo fazer um mapeamento deste potencial energético, devido principalmente a falta de medidas da radiação solar. O número de estações que fazem observações do elemento radiação é restrito, quando comparado com outras variáveis meteorológicas como temperatura do ar e precipitação pluvial. No Brasil, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) dispõe de 321 estações meteorológicas convencionais, dessas apenas 232 registra a duração do brilho solar e somente 58 (18,1%) registram a radiação solar por a actinógrafos, e, raríssimos são as medidas piranométricas. Assim, ainda faz-se necessário estimar a radiação por meio de modelos empíricos baseados em elementos meteorológicos (Lima, 2005), principalmente quando se necessita da espacialização dessa variável.

O aumento no número de sistemas de eletricidade rural, com tecnologia proveniente de painéis fotovoltaicos, requer o aperfeiçoamento dos procedimentos de projetos e trabalhos que permitem a redução do custo da energia foto-gerada, em virtude do aumento da demanda

energética e, principalmente, pela preocupação com a redução dos recursos naturais. Embora o aproveitamento da energia solar seja uma preocupação antiga em todo o globo, só por meados das últimas décadas foi possível observar melhorias nas técnicas, tendo isso possibilitado a construção de coletores solar, e outros componentes, que tornaram viável sua utilização com um alto rendimento e a custos compatíveis com fontes de energia “convencionais”. Atualmente alcançam-se patamares de utilização da Energia Solar que propicia ao aproveitamento dessa energia em diversas formas, destacando-se o aquecimento de água ou ar por meio de coletores solares e espelhos concêntricos e a geração de energia elétrica (Tiba, 1999; 2000).

2.2 – ESTIMATIVA PONTUAL DA RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar global (R_g), que inclui a radiação solar direta e difusa, constitui-se na componente de energia solar mais importante, cuja medição é feita, comumente, através de piranômetros. As condições de nebulosidade são um dos fatores que mais influenciam a variação da radiação solar global, principalmente em locais de baixa latitude. Tradicionalmente essas condições são classificadas em três categorias (ou grau de nebulosidade), podendo ser identificadas através do índice de claridade, também chamado de coeficiente de transmitância atmosférica global (K_t). Este índice pode ser obtido pela razão entre a radiação solar global e a radiação solar incidente no topo da atmosfera (Iqbal, 1983). Diversos estudos tem sido realizado com o intuito de avaliar a variabilidade para medidas pontuais, da radiação solar global, em relação aos efeitos das condições de nebulosidade (transmitância atmosférica) e da sazonalidade. Estes trabalhos mostram que uma camada de nuvem pode causar um aumento ou de diminuição na ordem de 50% (Souza, 1997; Aguiar, 1997; Segal e Davis, 1992; Paliatsos et al., 2003; Soares et al., 2004; Souza et al., 2005)

Existem no mundo, diversos trabalhos (Kimbal, 1919; Ångström, 1924; Prescott et al., 1940; Allen et al., 1997; Grossi Gallegos, 1997; Suehrcke, 2000; Wong e Chow, 2001; Liu e Scott, 2001) de estimativa da radiação solar global em função de outras variáveis meteorológicas, tais como duração do brilho solar, nebulosidade, temperatura do ar e pressão atmosférica, umidade relativa do ar e precipitação pluvial. A escolha da variável que define a estimativa fica a critério da disponibilidade do elemento meteorológico, que também é uma dificuldade quando se pretende mapear uma região. Dentre os trabalhos de estimativa destaca-se Tiba (1997; 2000), para Nordeste Brasileiro (NEB) e para o Brasil, e Nicácio (2002) para

região de Maceió–AL. Recentemente observam-se estudos utilizando novas técnicas como modelos de lógica fuzzy e Redes Neurais.

2.3 – ESTIMATIVA ESPACIAL DA RADIAÇÃO SOLAR

Bennett (1965), relatou a confecção de mapas mensais de médias diárias de radiação solar para os Estados Unidos. Neste trabalho foram testados vários modelos estatísticos visando suprir a falta de dados ou dados incompletos em algumas estações. Muitas estações de coleta tiveram os dados desconsiderados pela falta de confiabilidade nos mesmos e substituídos por valores estimados. Devido ao tamanho continental dos EUA, a presença de muitas regiões climáticas e várias altitudes, foi necessário testar várias equações. Após os testes das equações foram gerados 12 mapas mensais de médias diárias de radiação solar em ly/dia.

Em 1987, a Organização Latino Americana de Energia (OLADE) publicou o Atlas de Climatologia Solar para a América Latina e Caribe. O Atlas foi feito a partir de pesquisas sobre a solarimetria física e modelos de estimação existentes. A base de todo o cálculo se estabeleceu nas medidas de insolação, pois as medidas de radiação eram, como hoje, escassas. Devido à falta de consenso sobre o melhor modelo a ser aplicado nos diversos países, optou-se por determinar, inicialmente, o K_t para aplicação no modelo de Ångström modificada por Page. Com esta equação foram determinados os valores de K_t para cada ponto sobre o território em questão. Com o K_t conhecido e a correspondente latitude, tem-se finalmente o valor de R_g . Os dados de radiação global média foram convertidos em radiação global máxima média mensal e radiação máxima direta média mensal utilizando-se de funções conhecidas na literatura. O Atlas de mapas de radiação foi feito com 12 cartas mensais por sub-região e para cada uma das radiações: radiação global máxima média mensal e radiação máxima direta média mensal (OLADE, 1987).

Ahmad et al. (1983), publicaram artigo relatando a confecção de mapas mensais de radiação solar para o Iraque. Utilizaram dados obtidos pela Organização Meteorológica Iraquiana. As estações, num total de oito, possuíam dados coletados entre cinco e dez anos. A maioria das estações só possuía medidas de horas de brilho de Sol. Somente três estações possuíam medidas de insolação e radiação. Foram utilizados seis modelos diferentes relacionando K_t , fração de insolação e umidade relativa para realização de testes. Aplicou-se também o modelo de Ångström–Prescott para determinar os coeficientes a e b . Existem na

literatura vários outros trabalhos de traçado de mapas de radiação solar global e que não serão descritos, apenas citados. Entre eles: Balling et al..(1983); Balling (1983); Supit e van Kappel (1998).

Kessler e Corbella (1979) utilizaram dados de 25 estações de medida do IPAGRO-RS (Instituto de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Sul), utilizando diferentes períodos para cada estação, variando de doze a quinze anos. As cidades, sem estações de coleta tiveram todos os seus dados estimados pela modelo de Ångström–Prescott. Foram encontrados possíveis fontes de erro nos valores estimados, utilizado-se um único valor de a e b para todo o estado.

Nunes et al. (1979) adaptaram para o Brasil o modelo proposto por Bennett (1967). Este modelo determina a radiação solar global a partir de uma formulação que, além de considerar o efeito do número de horas de insolação, incorpora também os efeitos relativos à altitude, latitude e época do ano. O erro apresentado entre os valores estimados e valores de validação em dois pontos com latitudes muito diferentes foi de apenas 2,5 % (GTES, 1999).

Recentemente a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), com o apoio do Ministério de Minas e Energia, CEPEL/Eletróbrás lançaram o Atlas Solarimétrico do Brasil. O Atlas foi desenvolvido a partir de dados de superfície coletados em estações do INMET distribuídos pelo Brasil e de outros órgãos estaduais e de Universidades. Para o traçado das isolinhas de radiação solar foram priorizados dados provenientes de piranômetros (com faixa de erro entre 3% e 5%) em detrimento aos dados provenientes de actinógrafos. Extrapolaram-se os valores obtidos por piranômetros em 200 km admitindo a anisotropia. Tiba, et al. (2002), afirmam que estudos recentes sobre variabilidade espacial do recurso solar em regiões fitogeográficas homogêneas indicam que é possível extrapolar valores medidos até 200 km distantes com erros de 15%, e com um nível de confiança de 90 %.

2.4 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS

A Geoestatística é definida como a aplicação da Teoria de Funções Aleatorias para estimativa e o reconhecimento de fenômenos naturais, ou simplesmente, o estudo das variáveis numéricas distribuídas no espaço, sendo assim uma ferramenta útil no estudo destas variáveis. Os fenômenos distribuídos no espaço, apresentam distribuição heterogênea, ou seja, uma tendência caótica ou aleatório na escala local, mas ao mesmo tempo em escala global

(Figura 1) (Chauvet, 1994). O objetivo dos estudos em Geoestatística é a modelagem de um fenômeno real usando alguns pontos de dados experimentais no espaço de estudo. Primeiramente, a geoestatística foi utilizada para estudar uma única variável, posteriormente métodos geoestatísticos foram desenvolvidos para múltiplas variáveis e para quantificar variáveis correlacionadas, não conhecidas ou de difícil determinação (McBratney et al., 1991). No Brasil, o emprego de amostragem regionalizada de métodos geoestatísticos ainda é pouco disseminado em comparação aos métodos convencionais de análises estatísticas espaciais.

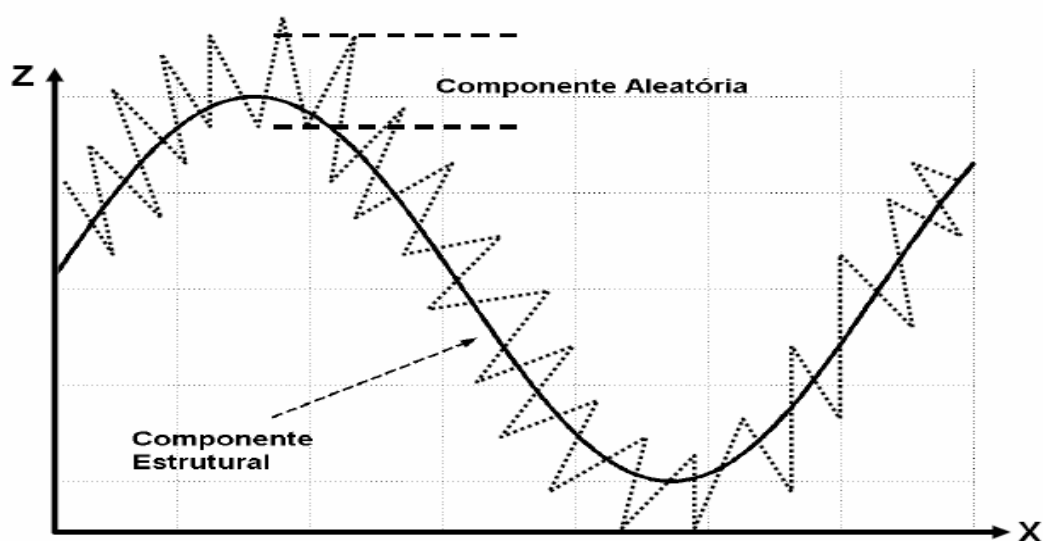


Figura 1 – Caráter misto de uma estrutura aleatória, ou seja, distribuição heterogênea, de comportamento caótico.

Uma das técnicas mais utilizada é a da Krigagem (*Kringing*), aplicada para interpolar uma dada variável, que tem como objetivo achar a melhor estimativa possível a partir da informação disponível. O valor estimado obtido $Z^*(x)$ de um valor real e desconhecido $Z(x)$, consiste em uma combinação linear de pesos associada a cada localização onde é exibido um valor $Z(x_i)$ ($i = 1, \dots, n$) do fenômeno estudado, observando duas condições fundamentais: que o estimador é imparcial e que a discrepância seja mínima, conseguindo desta forma minimizar ao máximo a discrepância do erro da estimativa. Ao contrário de outros métodos de interpolação, assim como o inverso da potência da distância, a Krigagem usa na estimativa as características de variabilidade e correlação de espaço do fenômeno estudado, o que distingue de outros métodos de interpolação (Armstrong e Carignan, 1997). O variograma é uma ferramenta básica às técnicas de krigagem que permite uma representação quantitativa da variação de um fenômeno regionalizado no espaço e/ou no tempo. A

consistência dos pontos do variograma experimental irá depender exclusivamente do número de pares das amostras (Corá, 1996).

2.4.1 - A ANÁLISE ESTRUTURAL OU O ESTUDO VARIOGRÁFICO

A análise estrutural ou o estudo variográfico é composto pelo cálculo do semivariograma experimental e o ajuste de um modelo teórico conhecido (Armstrong e Carignan, 1997). O cálculo do semivariograma experimental é a ferramenta geoestatística mais importante na determinação das características de variabilidade e correlação espacial de qualquer fenômeno estudado, propiciando o conhecimento da tendência de uma variável de uma localização para outra, representando o que de mais útil e importante se tem na geoestatística para a análise de fenômenos ou da distribuição espacial (Issaks e Co., 1999; Sahin et al., 1998). O semivariograma experimental deve ser ajustado a vários modelos teóricos, sendo obtido uma função modelo ou analítica que caracteriza a continuidade espacial da variável estudada.

A função semivariograma deve o seu nome a Matheron (entre 1957 e 1962), bem como o seu tratamento e interpretação teórica e prática, embora seja uma função conhecida anteriormente, já tendo sido citada por Langsaetter em 1926 (Batista, 2002). A definição teórica dessas ferramentas é baseada na teoria das funções aleatórias, que apresenta a estimativa experimental dessas estatísticas. Supondo que $Z(x)$ represente o valor da variável para o local x , onde x é o vetor (x,y) e $Z(x+h)$ representa o valor da mesma variável para alguma distância h (ou “lag”), em qualquer direção. O variograma resume a continuidade espacial para todos os pareamentos (comparação de dois valores) e para todos os h significativos. Ocorrem três tipos de semivariogramas: observado ou experimental (obtido a partir das amostras colhidas no campo), verdadeiro (real, mas desconhecido) e teórico (de referência, utilizado para o ajuste do modelo) (Braga, 1990; Guerra, 1988). A dependência espacial é analisada, pela expressão abaixo:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2Np(h)} \sum_{i=1}^{Np(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (01)$$

em que : $\gamma(h)$ é o valor do semivariograma estimado para a distância h , $Np(h)$ o número de pares para a distância h , h é a distância entre medições (incremento), $Z(x_i)$ são os valores experimentais, x_i a localização onde são medidos os valores $Z(x_i)$.

O gráfico do variograma tem as seguintes características: passa pela origem (para $h=0$, $\gamma(h)=0$) e geralmente é uma função crescente de h . Na maioria dos casos $\gamma(h)$ cresce até certo limite chamado patamar, em outros casos pode crescer indefinidamente e o seu comportamento na origem pode ter formas diferentes (Figura 2). Dentre os modelos teóricos dos semivariogramas sobressaem-se o esférico, o exponencial, o gaussiano e os lineares com e sem patamar (Curran e Atkinson, 1998).

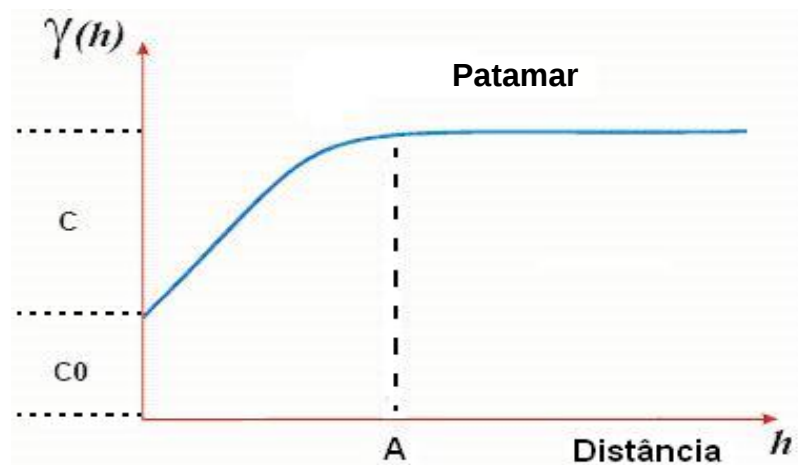


Figura 2 – Forma gráfica típica do semivariograma ($\gamma(h)$ em função de h).

As seguintes informações podem ser extraídas do semivariograma:

- O Efeito Pepita (C_0) corresponde a cota do ponto onde o semivariograma corta o eixo das ordenadas. Este ponto reflete as microestruturas não captadas pela menor escala da amostragem, erros de amostragem, de análises laboratoriais, etc. Quando o Efeito Pepita (C_0) for aproximadamente igual ao Patamar ($C+C_0$), denomina-se Efeito Pepita Puro demonstrando que a amostra não recebe influência espacial.

- O Alcance (a) corresponde ao conceito da Zona de Influência ou de Dependência Espacial de uma amostra, marcando a distância a partir da qual as amostras tornam-se independentes.
- O Patamar ($C+Co$) corresponde ao ponto onde toda semivariância da amostra é de influência aleatória, correspondendo a variância total (s^2) obtida pela estatística clássica.

Os semivariogramas expressam o comportamento espacial da variável regionalizada ou de seus resíduos e mostra o tamanho da zona de influência em torno de uma amostra. A habilidade dos variogramas em separar a variância de amostras entre componentes espaciais e casuais permite avaliações aperfeiçoadas de espaçamento e quantidade de amostragem. A sensibilidade dos semivariogramas, para detectar a variabilidade espacial das amostras, está diretamente ligada ao melhor ajuste dos dados experimentais ao modelo teórico do variograma (Landim, 1998; Tsegaye e Hill, 1998).

2.5 - GEOESTATÍSTICA COMO MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO DOS DADOS

2.5.1 – GEOESTATÍSTICA CLÁSSICA

A base da análise Geoestatística, que possui mais de 30 técnicas de interpolação, é levar em conta a dependência ou a (auto-)correlação espacial dos dados para a atribuição de pesos aos pontos circunvizinhos a serem utilizados na interpolação. Assim, Geoestatística é a teoria e prática da estatística aplicada ao estudo de dados distribuídos no espaço e permite ainda quantificar a incerteza associada a cada ponto interpolado, seja pela distribuição espacial dos pontos pela variância da Krigagem, levando-se em conta seus valores pela variância da interpolação, pela geração de cenários por simulação geoestatística ou pela função de densidade de probabilidade a posteriori pelo processamento de informação e conhecimento disponível sobre o fenômeno (Christakos, 2000; Yamamoto, 2000).

Muitos autores pesquisaram métodos de interpolação e principalmente compararam os diversos métodos, como: método da triangulação, método dos polígonos, método do inverso da potência da distância, método do vizinho mais próximo, método da Krigagem

(com mais de 30 técnicas distintas) e Máxima Entropia Bayesiana, onde o mais difundido é a da Krigagem.

A Krigagem é definida como uma série de técnicas de análise de regressão que procura minimizar a variância estimada, a partir de um modelo prévio, que leva em conta a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço. Três características da Krigagem a distinguem dos outros métodos de interpolação. Primeiro, a Krigagem pode fornecer uma estimativa que é maior ou menor do que os valores da amostra, sendo que as técnicas tradicionais estão restritas a faixa de variação das amostras. Segundo, enquanto os métodos tradicionais usam distâncias Euclidianas para avaliar as amostras, a Krigagem tem vantagem de usar a distância e a geometria (relação de anisotropia) entre as amostras. Terceiro, diferentemente dos métodos tradicionais, a Krigagem leva em conta a minimização da variância do erro esperado, por meio de um modelo empírico da continuidade espacial existente ou do grau de dependência espacial com a distância ou direção, isto é, através do variograma, covariograma ou correlograma.

As formas usuais de Krigagens lineares são: simples, ordinária, universal e intrínseca. As krigagens não-lineares utilizam alguma transformação não-linear dos dados originais e são: lognormal, multigaussiana, indicativa, probabilística e disjuntiva (Landim, 1998; Rossi et al., 1994). A Krigagem Ordinária, que é a variação mais utilizada da Krigagem simples, descrita por Trangmar et al. (1985), como o valor interpolado $\hat{Z}_{(x_0)}$ de uma variável regionalizada Z , num local x_0 pode ser determinada por:

$$\hat{Z}_{(x_0)} = \sum_{i=1}^n [\lambda_i \cdot Z_{(x_i)}] \quad (02)$$

em que: $\hat{Z}_{(x_0)}$ é valor estimado para local x_0 não amostrado, $Z_{(xi)}$ é valor obtido por amostragem no campo, n número de amostras vizinhas, λ_i é o pesos aplicados em cada $Z_{(xi)}$, sendo gerados por um estimador BLUP (*Best Linear Unbiased Predictor*), descrito por Schmalwieser e Schauburger (2001) como estimadores lineares não viciados e de mínima variância.

A construção do estimador $\hat{Z}_{(x_0)}$ na Krigagem Ordinária, não requer o conhecimento inicial da média estacionária da amostragem, mas requer que a soma dos pesos $\sum \lambda_i$ seja igual a 1. O sistema de Krigagem Ordinária tem solução única se o modelo de variograma for válido. A Krigagem, além de ser um estimador não tendencioso, é um interpolador exato, isto

é, se o ponto a ser estimado coincidir com um dos pontos amostrados, o valor estimado deverá ser igual ao valor amostrado. É essencialmente idêntica a regressão linear múltipla, com algumas diferenças quanto ao uso das matrizes utilizadas para resolver os sistemas (Uzumaki, 1994).

2.5.2 – GEOESTATISTICA MODERNA (MÁXIMA ENTROPIA BAYESIANA)

A abordagem estocástica, como a Geoestatística Clássica, tem por base os conceitos da Teoria da Probabilidade e das Funções Aleatórias como já foi discutido em itens anteriores. Novas propostas começam surgir como, a Máxima Entropia Bayesiana (Bayesian Maximun Entropy-BME), que faz parte da moderna Geoestatística espaço-temporal (ou Sistema de Informação Geográfica e Temporal-SIGT) (Serre, 1999; Christakos 2000; 2002), que incorpora leis físicas (abordagem determinística), modelos (co)variográficos (abordagem estocástica) e empíricas, como por exemplo: Conhecimento Geral (*G*) e dados da área como Conhecimento Específico (*S*), do tipo *hard* e *soft*, além de trabalhar no espaço e no tempo.

A vantagem da abordagem estocástica é a de utilizar os dados para a modelagem, enquanto a abordagem determinística o utiliza somente para a calibração do modelo. No entanto, a modelagem determinística permite simular a tendência (ou resposta), como o que ocorre em variações climáticas. A metodologia de Máxima Entropia Bayesiana vem de encontro aos problemas encontrados na geoestatística clássica, quando permite a combinação das abordagens determinísticas e estocásticas.

Métodos tradicionais de análise espacial e mapeamento, como a geoestatística clássica e ajuste de superfícies ou funções, usam somente as observações disponíveis, algumas vezes denominadas de dados fiáveis. Alguns utilizam dados secundários, alguns expressando tendências correlacionadas com a variável de interesse. Muitos desses métodos, no entanto, têm um caráter puramente experimental desconsiderando os conteúdos físicos e epistemológicos. Como resultado eles não contam com importantes fontes de conhecimento prévio e dados com ausência de precisão, conhecidos por dados *soft* (*soft data*), tais como observações dentro de intervalos, momentos de alta ordem, dados probabilísticos, leis físicas, experiência prévia, etc (Lin, 1996).

O método da Máxima Entropia Bayesiana, fornece uma abordagem mais sistemática e rigorosa para incorporar, nas análises e mapeamentos de variáveis naturais, dados *soft* e outras fontes de informação, mas não representa nenhuma nova metodologia em si, nem deve

ser encarada como panacéia na modelagem espacial. Esse método permite o mapeamento espaço-temporal da variável em estudo e sua extrapolação temporal. A BME baseia-se no processamento de diferentes fontes e tipos de conhecimento. Um outro destaque dessa metodologia é a incorporação sistemática de dados *soft*, dados que são incertos, expressos por intervalos ou curvas de probabilidade. O processamento do conhecimento geral, a maximização dessa informação, sua condicionalização ao conhecimento específico e a integração e formalização matemática do conhecimento físico configuram o arcabouço dessa metodologia. Esse método vem sendo desenvolvido pelo Prof. Dr. George Christakos e seus colaboradores desde a década de 1980, sendo chamada de Moderna Geoestatística Espaço-Temporal. É implementada computacionalmente pelo pacote BMELib (Christakos , 1990; 1992; 2000).

2.6 - VALIDAÇÃO CRUZADA

Para a comparação dos métodos de interpolação alguns critérios são utilizados, como por exemplo: quadrado médio do erro, quadrado da soma dos erros e coeficiente de correlação entre os valores observados e estimados obtidos pela Validação Cruzada (cross-validation) proposto por Leenaers et al.. (1990). Com toda a variabilidade de resultados nos cálculos dos parâmetros do variograma, é importante que se tenha um meio para checar se o modelo ajustado é satisfatório ou não, bem como para validar o plano de modelos como: Krigagem, BME antes do seu uso na construção de mapas.

O método da reutilização da amostra utilizado por Schucany (1981), que tem o propósito de predição de locais não amostrados, foi empregado por Geisser (1975) pela primeira vez. Mais tarde, Davis (1987) descreveu o método de “deixar um dado de fora” (*leaving-one-out*), ressaltando a diferença da validação cruzada com outro método, muito confundido em inúmeros trabalhos, que tem função distinta que é o “*Jackknife*”. Os dois métodos são diferentes, a validação cruzada é um método de verificação dos dados estimados e “*Jackknife*” é um estimador introduzido por Quenouille (1956), para reduzir a tendência; sendo que Tukey (1958), estendeu o seu uso para construir o intervalo de confiança da amostra.

O processo de validação cruzada, de acordo com Myers (1997), é bastante simples: remove-se um dado do conjunto de dados amostrais e, usando-se um estimador e função ponderada relacionada com a distância, estima-se o valor retirado, utilizando-se as amostras

remanescentes. Têm-se, agora, dois valores para o mesmo ponto, o real e o estimado. O erro da estimação pode ser calculado pela diferença entre o valor real e o estimado, sendo repetido para cada local amostrado. Um fator que afeta o cálculo de precisão do método de interpolação é o número de amostragens vizinhas usadas para a estimação. Alguns autores descreveram o emprego e vantagens da validação cruzada sobre outros métodos na avaliação do ajuste do modelo do semivariograma (Goovaerts, 1999).

3.0 - MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - MATERIAL

3.1.1 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Estado de Alagoas, localizado no Leste da região do Nordeste Brasileiro (NEB), é constituído por 102 municípios, distribuídos em uma área de 27.933,1 Km², que correspondente a 0,32% do território nacional e a 1,8% da região Nordeste. O estado apresenta uma extensa faixa costeira, aproximadamente 230 Km, ao longo do Oceano Atlântico, entre as coordenadas geográficas 35° 8'W e 38° 15'W de latitude e 8° 45'S e 10° 30'S de longitude, fazendo divisa ao norte e noroeste com o Estado de Pernambuco, ao sul com Sergipe, e ao sudoeste com a Bahia (Figura 3). Seu relevo é caracterizado como planície litorânea, planalto ao norte e depressão no centro.

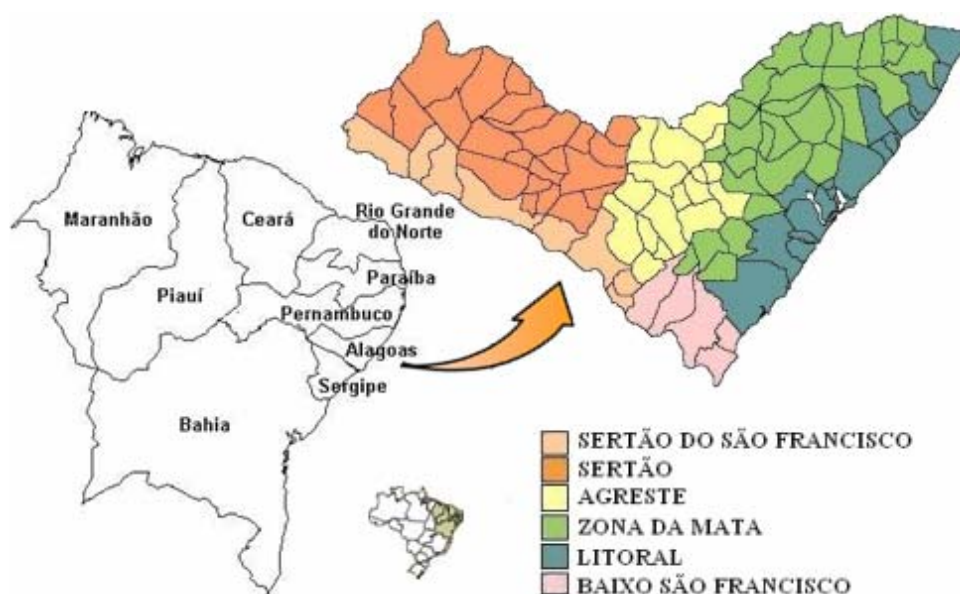


Figura 3 – Mapa do estado de Alagoas com sua localização no Nordeste e suas mesoregiões.

O clima do estado, em geral, é tropical, com temperatura média anual de 24°C e está dividido basicamente em seis regiões ambientais: Litoral, Zona da Mata, Agreste, Sertão, Sertão do São Francisco e Baixo São Francisco. Quanto à vegetação, o estado possui uma vegetação típica de: floresta tropical, mangues litorâneos e caatinga (SEBRAE, 2003).

- Região Leste: abrange a Zona da Mata e o Litoral.
- Região Oeste: abrange o Sertão e o Sertão do São Francisco
- Região Sul: abrange o Baixo São Francisco.
- Região Agreste: considerada uma região de transição.

3.1.2 - TRATAMENTO DOS DADOS

TEMPERATURA DO AR

Diversos trabalhos têm sido realizados no intuito de se obter uma equação para a estimativa da temperatura do ar para algumas localidades da região do NEB, adotando métodos estatísticos para determinar a estimativa da média mensal de temperatura do ar máxima (T_x) e mínima (T_n) em função das coordenadas geográficas de outras localidades (Equação 3), que apresentam características semelhantes à área de estudo. Neste trabalho, para estimar a T_x e T_n para os 102 municípios do Estado de Alagoas (Figura 4), foram utilizados os coeficientes determinados por Góis et al. (2005). Estes coeficientes foram gerados utilizando dados de T_x , T_n e dados geográficos (latitude, longitude e altitude) de 32 localidades do Estado de Alagoas, através do método dos mínimos quadrados. Utilizou-se os dados de T_x e T_n mensais estimados como dados de entrada para o modelo de radiação solar global.

$$T_m = a + b\varphi + c\lambda + dz \quad (03)$$

sendo:

T_m = Valor estimado da temperatura média máxima ou mínima do mês (°C);

φ = Latitude (graus e décimos);

λ = Longitude (graus e décimos);

z = Altitude (m);

(a, b, c e d) = Coeficientes estimados por Góis et al. (2005) (Apêndice B)

RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL

Os dados de radiação solar global utilizados neste trabalho, foram do período de janeiro de 1997 a 2003. Estes dados foram obtidos do banco de dados do Laboratório de Agrometeorologia, do Grupo de Pesquisa de Agrometeorologia e Recursos Naturais, da Universidade Federal de Alagoas (UFAL). No período de 1997 – 1999 as observações foram realizadas na Estação Radiometria Solar no Departamento de Meteorologia da UFAL em Maceió (9°40'S de latitude, 35°42'W de longitude, 100m). As observações do correspondentes ao período de 2000-2003 foram realizadas na Estação Agrometeorologica, no Centro de Ciências Agrarias (CECA), situada no município de Rio Largo-AL, (9°28'02"S; 35°49'43"W; 127m). As duas estações se distanciam aproximadamente 12 km. Diante da proximidade das estações e das homogeneidades climáticas, os dados foram utilizados na validação dos modelos de estimativas da radiação solar global para região de Maceió-AL.

PRECIPITAÇÃO PLUVIAL

Utilizou-se dados do banco da Agência Nacional de Águas (ANA), os quais estão disponíveis no site da HIDROWEB (<http://hidroweb.ana.gov.br>), no formato "Access[®]", com registros diários de chuva e médias mensais e anuais, bem como outras informações quanto às próprias estações. Foram utilizadas 63 estações com series entre 1965 e 1980, estas estações eram as únicas que se encontravam com um período hidrológico comum, e com menor quantidade de falhas nos dados amostrados, além de estarem homogeneamente distribuídas. Baseado no estudo realizado por Cardim (2003), utilizando séries de precipitação pluvial de 1913-1985, que definiu o período do início e fim da estação de cultivo para o Estado de Alagoas, foi possível determinar o período úmido (chuvoso) e o seco de acordo com a série utilizada neste trabalho.

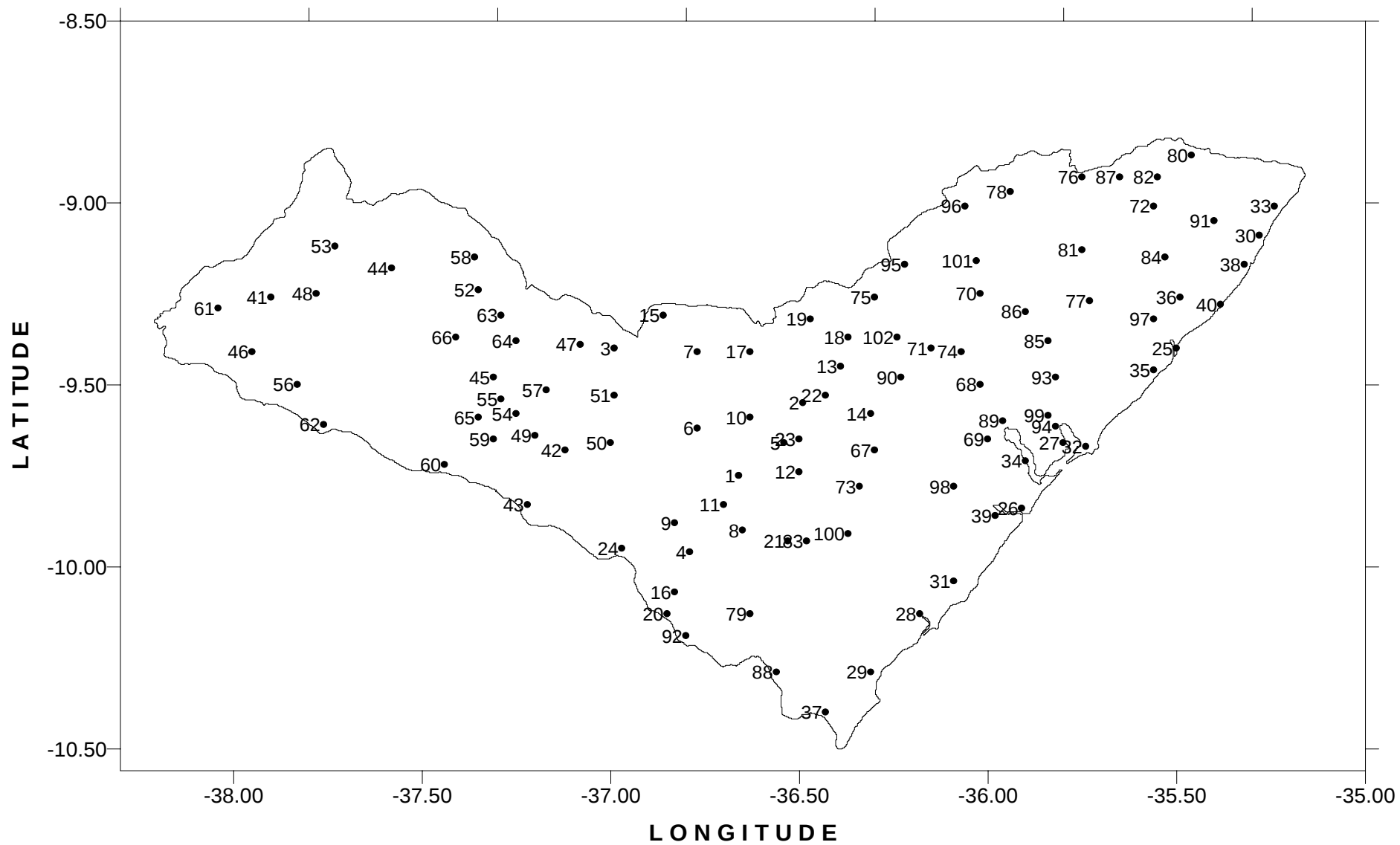


Figura 4 - Localização e Distribuição Geográfica dos 102 Municípios do Estado de Alagoas

**LEGENDA: DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS 102 MUNICÍPIOS DO ESTADO DE ALAGOAS
(FONTE: ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ALAGOAS IBGE, 1998).**

COD.	MUNICÍPIO	Φ	Λ	Z	COD.	MUNICÍPIO	Φ	Λ	z
1	Arapiraca	-9,75	-36,66	265	52	Maravilha	-9,24	-37,35	362
2	Belém	-9,55	-36,49	311	53	Mata Grande	-9,12	-37,73	633
3	Cacimbinhas	-9,40	-36,99	270	54	Monteirópolis	-9,58	-37,25	228
4	Campo Grande	-9,96	-36,79	142	55	Olho D'água das Flores	-9,54	-37,29	286
5	Coite do Nóia	-9,66	-36,54	280	56	Olho D'água do Casado	-9,50	-37,83	230
6	Craibas	-9,62	-36,77	252	57	Oliveira	-9,52	-37,17	231
7	Estrela de Alagoas	-9,41	-36,77	147	58	Ouro Branco	-9,15	-37,36	380
8	Feira Grande	-9,90	-36,65	220	59	Palestina	-9,65	-37,31	160
9	Girau do Porciano	-9,88	-36,83	244	60	Pão de Açúcar	-9,72	-37,44	19
10	Igaci	-9,59	-36,63	240	61	Pariconha	-9,29	-38,04	550
11	Lagoa da Canoa	-9,83	-36,70	283	62	Piranhas	-9,61	-37,76	88
12	Limoeiro de Anadia	-9,74	-36,50	140	63	Poço das Trincheiras	-9,31	-37,29	292
13	Mar Vermelho	-9,45	-36,39	542	64	Santana do Ipanema	-9,38	-37,25	250
14	Maribondo	-9,58	-36,31	157	65	São José da Tapera	-9,59	-37,35	255
15	Minador do Negrão	-9,31	-36,86	270	66	Senador Rui Palmeira	-9,37	-37,41	352
16	Olho D'água Grande	-10,07	-36,83	118	67	Anadia	-9,68	-36,30	153
17	Palmeira dos Índios	-9,41	-36,63	342	68	Atalaia	-9,50	-36,02	54
18	Paulo Jacinto	-9,37	-36,37	292	69	Boca da Mata	-9,65	-36,00	132
19	Quebrangulo	-9,32	-36,47	366	70	Branquinha	-9,25	-36,02	100
20	São Brás	-10,13	-36,85	45	71	Cajueiro	-9,40	-36,15	102
21	São Sebastião	-9,93	-36,53	201	72	Campestre	-9,01	-35,56	105
22	Tanquedarcá	-9,53	-36,43	212	73	Campo Alegre	-9,78	-36,34	176
23	Taquarana	-9,65	-36,50	159	74	Capela	-9,41	-36,07	84
24	Traipú	-9,95	-36,97	45	75	Chã Preta	-9,26	-36,30	463
25	Barra de Santo Antônio	-9,40	-35,50	10	76	Colônia Leopoldina	-8,93	-35,75	140
26	Barra de São Miguel	-9,84	-35,91	2	77	Flexeira	-9,27	-35,73	78
27	Coqueiro Seco	-9,66	-35,80	31	78	Ibateguara	-8,97	-35,94	500
28	Coruripe	-10,13	-36,18	16	79	Igreja Nova	-10,13	-36,63	45
29	Feliz Deserto	-10,29	-36,31	57	80	Jacuípe	-8,87	-35,46	74
30	Japaratinga	-9,09	-35,28	57	81	Joaquim Gomes	-9,13	-35,75	104
31	Jequiá da Praia	-10,04	-36,09	57	82	Jundiá	-8,93	-35,55	94
32	Maceió	-9,67	-35,74	16	83	Junqueiro	-9,93	-36,48	175
33	Maragogi	-9,01	-35,24	57	84	Matriz do Amaral	-9,15	-35,53	16
34	Marechal Deodoro	-9,71	-35,90	31	85	Messias	-9,38	-35,84	148
35	Paripueira	-9,46	-35,56	57	86	Murici	-9,30	-35,90	500
36	Passo de Amaral	-9,26	-35,49	57	87	Novo Lino	-8,93	-35,65	146
37	Piaçabuçu	-10,40	-36,43	57	88	Penedo	-10,29	-36,56	57
38	Porto de Pedras	-9,17	-35,32	22	89	Pilar	-9,60	-35,96	57
39	Roteiro	-9,86	-35,98	32	90	Pindoba	-9,48	-36,23	310
40	São Miguel dos Milagres	-9,28	-35,38	1	91	Porto Calvo	-9,05	-35,40	54
41	Água Branca	-9,26	-37,90	570	92	Porto Real do Colégio	-10,19	-36,80	45
42	Batalha	-9,68	-37,12	120	93	Rio Largo	-9,48	-35,82	127
43	Belo Monte	-9,83	-37,22	30	94	Santa Luzia do Norte	-9,62	-35,82	32
44	Canapí	-9,18	-37,58	342	95	Santana do Mundaú	-9,17	-36,22	221
45	Carneiros	-9,48	-37,31	347	96	São José da Lage	-9,01	-36,06	256
46	Delmiro Gouveia	-9,41	-37,95	256	97	São Luís do Quitunde	-9,32	-35,56	4
47	Dois Riachos	-9,39	-37,08	245	98	São Miguel dos Campos	-9,78	-36,09	12
48	Inhapí	-9,25	-37,78	410	99	Satuba	-9,59	-35,84	6
49	Jacaré dos Homens	-9,64	-37,20	135	100	Teotônio Vilela	-9,91	-36,37	156
50	Jaramataia	-9,66	-37,00	164	101	União dos Palmares	-9,16	-36,03	155
51	Major Isidoro	-9,53	-36,99	182	102	Viçosa	-9,37	-36,24	210

3.2 – MÉTODOS

Para iniciar a análise dos modelos, primeiramente, determinou-se o coeficiente de ajuste (K_r) pelo método da pressão. Diante disso utilizou-se os dados da região de Maceió do período de janeiro de 1997 a dezembro de 2003 para avaliar qual foi a melhor metodologia para determinar radiação solar global. Em seguida, avaliou-se qual o melhor método entre o original proposto por Allen (1997) e o modificado por Nicácio (2002) para Maceió e regiões de mesmas características climáticas.

3.2.1 – ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL

Nas estimativas da Radiação Solar Global mensal, foi utilizado o modelo proposto por Allen (1997), onde a transmitância atmosférica global relaciona-se com as temperaturas máxima e mínima do ar e com a pressão atmosférica, como definido na expressão a seguir:

$$R_g = K_r (T_x - T_n)^c R_o \quad (04)$$

em que, K_r foi expresso por Allen (1995), em função da razão entre a pressão atmosférica local (P , kPa) e a pressão ao nível médio do mar (P_o , kPa), conforme a equação a seguir:

$$K_r = K_{ra} \left(\frac{P}{P_o} \right)^b \quad (05)$$

sendo os valores de b e c iguais a 0,5 e K_{ra} na ordem de 0,17 para regiões interiores e 0,20 para regiões costeiras e P_o igual a 101,3 kPa. Neste trabalho a pressão atmosférica foi calculada através da seguinte equação que leva em consideração a altitude do local e a temperatura do ar (máxima e mínima):

$$P = P_o \left(\frac{\bar{T} - 0,0065 z}{\bar{T}} \right)^{5,256} \quad (06)$$

em que: P_o é a pressão ao nível médio do mar (101,3 kPa), $\bar{T}$ é a temperatura média em Kelvin (K) e z a altitude do local (m).

Também foi utilizado o modelo de Allen (1997) modificado por Nicácio (2002), onde a equação pode ser expressa da seguinte forma:

$$R_g = a \left(\frac{P}{P_o} \right)^b (T_x - T_n)^c R_o \quad (07)$$

onde a , b e c são coeficientes obtidos para a cidade de Maceió, região costeira do estado de Alagoas, e com valores respectivamente igual a :0,149374 ; -9,84576 e 0,586084 .

A radiação solar no topo da atmosfera foi calculada em função da constante solar ($S_o=1367 \text{ W m}^{-2}$), raio vetor da órbita terrestre (E_o), latitude local (ϕ), declinação solar (δ) e do ângulo horário solar (H), conforme a expressões abaixo (Iqbal, 1983):

$$R_o = S_o E_o \cos \theta_z \quad (08)$$

em que,

$$E_o = 1 + 0,033 \cos \left(\frac{2 \pi d_n}{365} \right) \quad (09)$$

sendo, d_n o número do dia Juliano e θ_z o ângulo zenital solar dado por:

$$\cos \theta_z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos H \quad (10)$$

onde:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[\frac{360 \cdot (284 + dn)}{365} \right] \quad (11)$$

e o ângulo horário dado por:

$$H = 15 (h-M) + (l_l - l_p) \quad (12)$$

em que:

h = hora local padrão,

M = meio dia,

l_l = longitude local,

l_p = longitude padrão, (Meridiano de 45°)

3.2.2 – ESTIMATIVA ESPACIAL

A autocorrelação entre a radiação solar no Estado de Alagoas, durante os meses estudados, foi analisada mediante a construção dos variogramas experimentais médios adirecionais, e do ajuste de modelos teóricos aos experimentais. Vale lembrar que, para ajustar os modelos teóricos foram utilizados somente variogramas isotrópicos.

MODELAGEM VARIOGRAFICA

Utilizou-se o variograma escalonado para calcular os valores da variância, os quais são necessários para organização do sistema de equações de Krigagem. Foi necessário ajustar uma função matemática que descreva continuamente a variabilidade ou correlação espacial existente nos dados da Radiação Solar Global. Ou seja, para que sejam utilizadas as informações sobre a estrutura de variabilidade para futuras análises e interpolação, ajustou-se ao variograma empírico uma função teórica. Os modelos variográficos utilizados foram três, os quais são descritos a seguir:

- **Esférico (comportamento esférico na origem)**

Segundo Lamparelli et al.. (2001), o modelo que comumente explica ou ajusta grande parte dos fenômenos, é o modelo esférico. No modelo esférico, o patamar e o alcance são claramente identificados e o efeito pepita C_0 é pequeno em relação a este patamar.

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 [(3/2)(h/a) - (1/2)(h/a)^3], & 0 < h < a \\ C_0 + C_1, & h > a \end{cases} \quad (14)$$

- **Exponencial (comportamento "linear" na origem)**

O modelo exponencial cresce mais devagar da origem para o patamar, e não se pode dizer que o modelo atinge realmente o patamar (Lamparelli et al., 2001). Este modelo é dado por:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-h/a)] \quad h > 0 \quad (15)$$

onde, d é a máxima distância na qual o variograma é definido.

O alcance apresentado neste modelo, também é chamado de alcance teórico, uma vez que este parâmetro no modelo exponencial é considerado infinito. Segundo Carvalho (1997), na prática, considera-se o valor de “a” onde o variograma atinge 95% do patamar.

- **Gaussiano (comportamento "parabólico" na origem)**

Se o efeito pepita é desprezível e a estrutura de variabilidade cresce de forma suave, o variograma pode ser ajustado satisfatoriamente pelo modelo Gaussiano. Esse modelo é importante, pois apresenta boas propriedades, como uma continuidade na variabilidade à medida que os pontos se afastam entre si. O modelo é dado pela função:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-h/a)^2] \quad h > 0 \quad (16)$$

Para facilitar as análises, utilizou-se o variograma escalonado. O escalonamento foi realizado dividindo os valores γ e dos lags pelos seus respectivos valores máximos, de modo que o patamar tenda a 1, ou então, que os valores da variância estrutural estejam entre 0 e 1. Assim, obtém-se um variograma escalonado mediante a seguinte expressão:

$$(\gamma \text{ ou } lag)_i^{sc}(h) = \frac{\gamma_{i(h)} \text{ ou } lag}{\alpha_i} \quad (17)$$

onde: $\gamma_i^{sc}, lag_i^{sc}$ = valor do variograma ou do lag escalonado para a variável i .

α_i = fator de escala para a variável i .

MODELOS DE INTERPOLAÇÃO

Para a interpolação dos dados foi utilizado o modelo de Krigagem Ordinária (KO), afim de gerar dados de entrada para o método da Máxima Entropia Bayesiana. Foram utilizado os 102 pontos estimados de Radiação Solar Global como entrada para o modelo de interpolação. Na Krigagem Ordinária, as medidas foram modeladas da seguinte forma:

$$Z(xi) = f(xi) + \varepsilon(xi), \quad i=1, 2, \dots, n \quad ..(18)$$

em que, neste caso, $f(x_i)$ é considerado como realizações de função aleatória F num ponto x_i que pode conter uma função de determinística $\mu(x) = E\{F(x)\}$ para modelar possíveis tendências; $\varepsilon(x_i)$ são realizações médias de zero e erros randômicos uni-correlacionados. A tendência $\mu(x)$ é assumida na equação para constante desconhecida μ . A correlação espacial entre os pontos de medida pode ser quantificada por meio da função de variância:

$$\gamma(x, h) = \frac{1}{2} \text{var}[F(x) - F(x + h)] \quad (19)$$

em que, assumimos que h é a distância euclidiana entre dois pontos. Assume-se que a tendência é constante, e $\gamma(x, h)$ são independente de x . Uma função paramétrica é usada para modelar a variância para valores diferentes de h .

Foi utilizado uma grade regular que através da KO gerou mais 102 pontos. O método da Máxima Entropia Bayesiana utilizou dois sets de dados, o primeiro que foi gerada pelas estimativas utilizando o melhor modelo de estimativa da Radiação Solar Global e considerados como dados reais (dados *hard*) e o outro utilizando os dados gerados através da Krigagem Ordinária e o seus respectivos erros, considerados como dados *soft*. Também foi reutilizado os variogramas experimentais do primeiro set de dados, visto que ele será adotado como um conjunto de dados fiáveis.

3.2.3 – CALCULO DA DEPENDÊNCIA ESPACIAL

Para este estudo foram utilizados dois métodos para verificar a existência da dependência espacial mensal dos dados de R_g , assim como para T_x e T_n , que foram utilizados para esta estimativa. Aplicou-se os métodos propostos por Trangmar et al.. (1985), para medir a dependência espacial dos dados amostrados. Este método fornece a porcentagem da variância do efeito pepita, sendo calculado através da seguinte equação:

$$IDE (\%) = \frac{C}{C + C_0} 100 \quad (20)$$

Posteriormente, Cambardella et al. (1994) propuseram os seguintes intervalos para a mesma equação:

$\leq 25\% \rightarrow$ fraca dependência espacial

entre 25% e 75% $\rightarrow$ moderada dependência espacial

$\geq 75\%$ → forte dependência espacial

3.2.4 - VALIDAÇÃO CRUZADA DOS DADOS INTERPOLADOS

LEAVING-ONE-OUT

Zamboti (2001) menciona que a validação cruzada consiste em retirar do conjunto de dados um valor de cada vez e estimá-lo, utilizando-se o método de interpolação por Krigagem, a partir das observações remanescentes, que será sempre o conjunto de dados original menos uma observação. Retorna-se o valor ao conjunto e retira-se outro valor, repetindo-se o processo para o conjunto todo. Assim para cada observação tem-se o erro de estimativa que poderá ser padronizado pelo desvio padrão da estimativa.

MÉTODO DOUBLE KRIGING

Utilizou-se o método “*Double Kriging*”, ou Krigagem em dobro, este método consiste em avaliar o nível de semelhança entre os valores interpolados ou preditos e as observações originais, em todos os pontos de observação. A diferença neste método em relação a outros de validação está na forma dos cálculos:

- os dados preditos pela grade obtida da 1ª Krigagem (primeiro passo) servem como "dados de entrada";
- o valor médio nos locais das observações originais é calculado através da 2ª Krigagem (segundo passo) com os mesmos parâmetros da Krigagem e com os parâmetros do modelo do variograma;
- os resultados da 2ª Krigagem são, então, comparados com os dados originais observados em uma plotagem separada.

Desse modo, a qualidade da estimativa de variáveis, como a radiação solar, pode ser medida pelo julgamento desse método, assim como a reutilização dos dados interpolados.

3.3 - EQUIPAMENTOS E SOFTWARES UTILIZADOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado um computador Pentium IV de 2,8 GHz com 1.3 Gb de memória RAM e HD de 80 Gb. Para as análises foram desenvolvidas um conjunto de rotinas para Python, a qual tinha a finalidade de processar os dados de

entrada, realizar análise estatísticas, parametrizar e indicar os melhor modelo de estimativa da radiação solar global, assim como criar *sets* (conjuntos de dados) que foram utilizados para a espacialização (Figura 5). No tocante da espacialização, foram utilizados sub-rotinas de dois conjuntos de bibliotecas (*toolbox*), uma denominado *EasyKrig* (GLOBEC) versão 3.0 desenvolvida e cedida pelo Dr. Dezhang Chu, e o BMELib versão 2.0a, desenvolvida e cedida pelo Dr. Marc L. Serre e Patrick Bogaert da Universidade da Carolina do Norte.

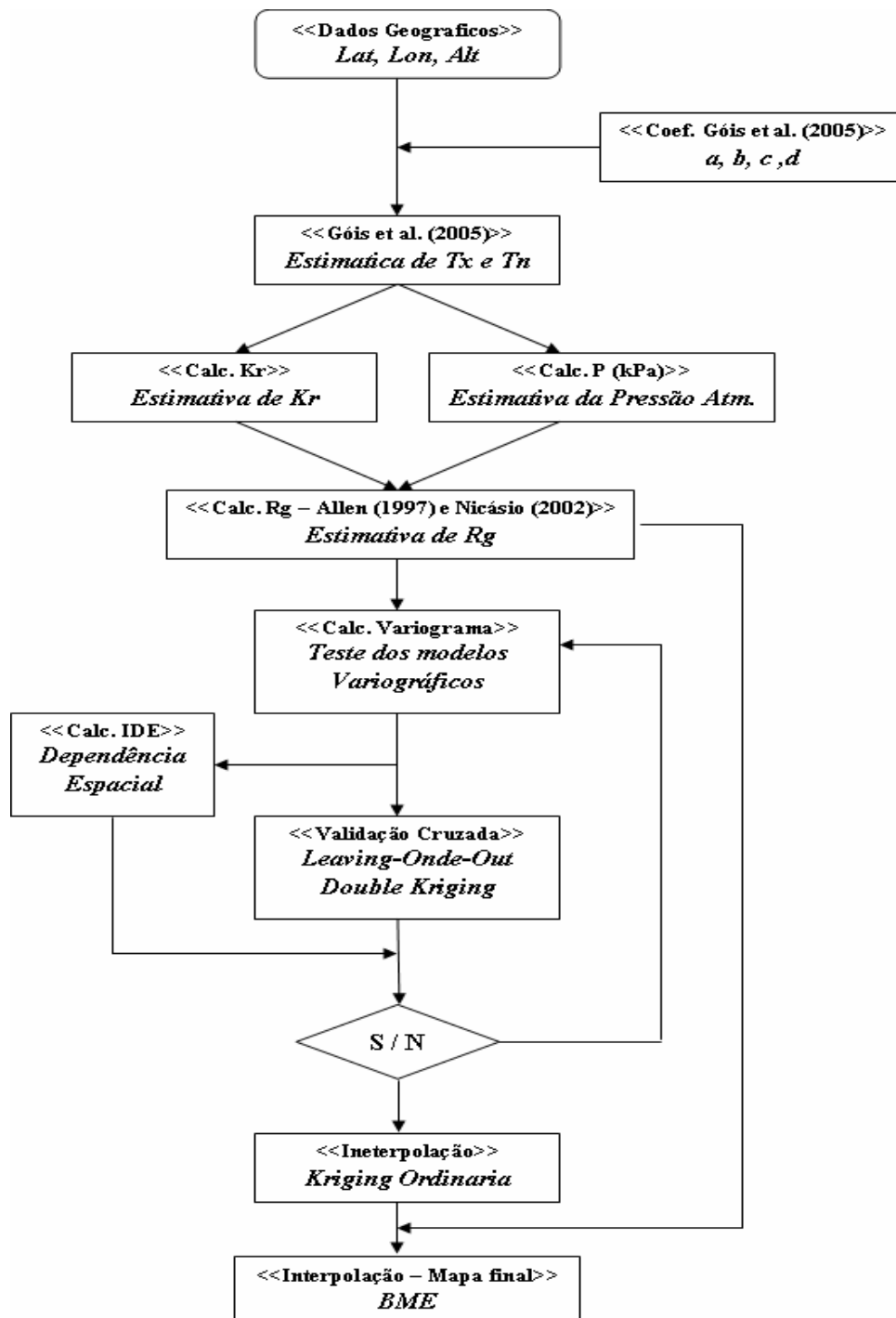


Figura 5 – Fluxograma da metodologia aplicada e do acoplamento das sub-rotinas utilizadas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. ANÁLISE DO MODELO ORIGINAL DE ALLEN (1997), E DO MODELO DE ALLEN MODIFICADO (NICÁCIO, 2002) PARA MACEIÓ-AL

A Figura 6 apresenta os valores de pressão atmosférica (kPa) e do coeficiente empírico K_r , calculado pelo método da pressão para 102 localidades em estudo. Observaram-se valores de K_r , variando entre 0,14 a 0,17, mantendo-se praticamente constante, com exceção dos locais onde se observaram picos de pressão. Nos locais (Zona da Mata, Agreste e Sertão) onde foi utilizado a equação para calcular K_r proposto por Allen (1995), observou-se que os coeficientes foram diretamente proporcional aos valores da pressão atmosférica, ou seja, quanto maior o valor da pressão, maior o valor do coeficiente, variando em torno de 0,165, tendo valor máximo de 0,169 (São Luis do Quitunde), com pressão atmosférica de 1001,28 kPa, e mínimo de 0,163 (Mata Grande) com pressão de 93,94 kPa. Entretanto no litoral, onde foi aplicada a forma modificada (Nicácio, 2002) para calcular os coeficientes, observou-se que os valores foram inversamente proporcionais aos da pressão atmosférica, com valor mínimo de 0,149 (Barra de São Miguel) com pressão de 101,30 kPa, e máximo de 0,159 com pressão de 100,64, este valor foi observado em mais de uma localidade (Feliz Deserto, Japaratinga, Jequiá da Praia, Maragogi, Paripueira, Passa de Camaragibe e Piaçabuçu).

Na Figura 7 visualiza-se a distribuição espacial do coeficiente K_r , no Estado. Notou-se um gradiente positivo do Litoral para o Continente, com extensas áreas homogêneas, visto a sua baixa oscilação, com destaque nas regiões que compreende a Zona da Mata, parte do Agreste e o Baixo São Francisco, com valores na ordem de 0,168, essas região tiveram seus coeficientes

calculados com o modelo proposto por Allen (1995). No litoral onde utilizou-se a forma modificada por Nicácio (2002), observou-se gradiente superior em toda a região, com pequenas áreas de homogeneidade, e núcleos na ordem de 0,15 ao longo de toda a costa. Allen (1997) cita que o coeficiente de ajuste varia com o tempo, local assim como o clima.

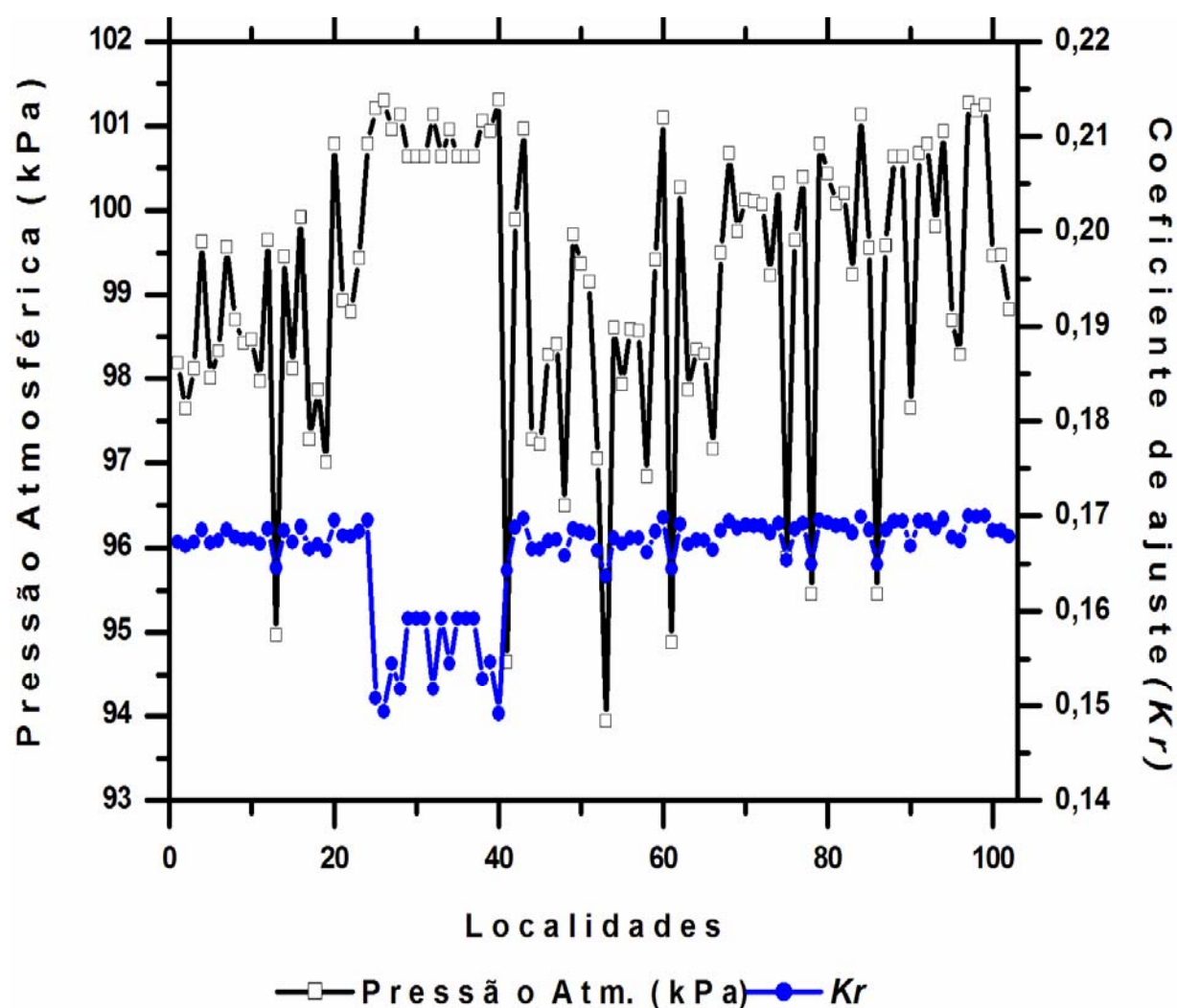


Figura 6 – Distribuição da Pressão Atmosférica (kPa) e do coeficiente de ajuste (K_r) para as 102 localidades do estado de Alagoas, calculado pelos métodos de original de Allen(1995) e o método modificado por Nicácio (2002).

Na Figura 8 observa-se a comparação da radiação solar global, obtida através da média mensal e as estimadas. Verificou-se que o modelo original proposto por Allen (1997), mostrou uma tendência de superestimativa, com exceção do mês de abril, onde se observou um erro médio absoluto na ordem de $7,23\text{MJm}^{-2}$. Este valor está associado a pequena amplitude térmica encontrada entre as temperaturas máximas e mínimas do ar, que foi da ordem de $25,8$ e $22,6$ °C respectivamente (Figura 9). De forma geral, o modelo utilizando os coeficientes originais mostrou dificuldade em estimar a radiação solar nos meses de janeiro a fevereiro, e de outubro a dezembro, obtendo erros na ordem de 2 MJm^{-2} . Observa-se nestes meses os períodos de transição da estação seca para o período chuvoso, o contrario também pode ser aplicado para os meses de outubro a dezembro. Entretanto o modelo modificado por Nicácio (2002) obteve melhor ajuste aproximando-se dos valores médio observados e com erros absolutos entre $-2,40\text{ MJm}^{-2}$ em fevereiro e $-0,03\text{ MJm}^{-2}$ em julho, mostrando que o modelo modificado também superestimou os valores observados, entretanto com erros menores aos do modelo original, e subestimando nos meses de março e setembro, com valores na ordem de $0,56$ e $0,58$ respectivamente.

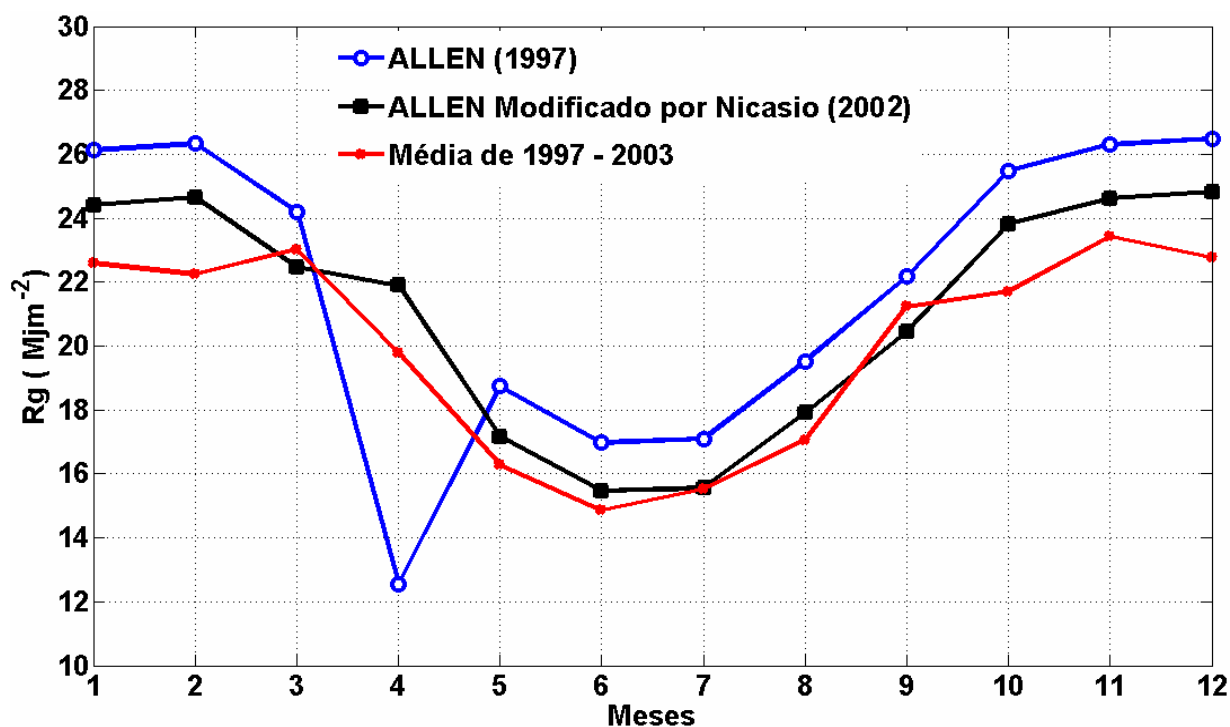


Figura 8 – Variação média mensal da radiação solar global observada no período de 1997-2003 os valores estimados pelos métodos propostos por Allen, 1997, e Nicácio, 2002, para região de Maceió-AL.

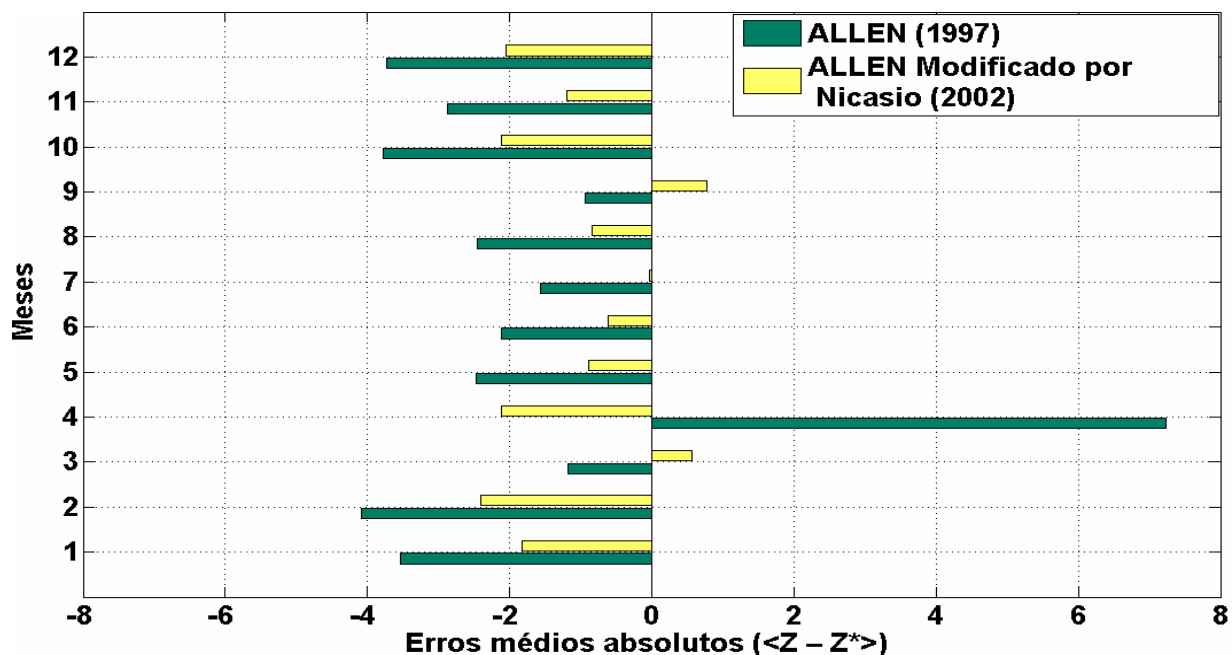


Figura 9 – Variação do erro médio absoluto entre os modelos de original de Allen (1997) e o modelo modificado (Nicácio, 2002), e os dados observados durante o período de 12 meses.

Em estudo preliminar observou-se que o modelo modificado, quando aplicado a região da Zona da Mata, visto a sua semelhança climática com a região a qual foi utilizado dados para validar o modelo, obteve-se valores superiores ao da radiação no topo da atmosfera. Diante disto foi considerado o modelo modificado para estimar a radiação solar para região do apenas no Litoral do Estado de Alagoas e o modelo proposto por Allen (1997) para as outras regiões.

4.2. ANÁLISE GEOESTATÍSTICA DOS VARIOGRAMAS

Em análise preliminar utilizando a serie histórica 1965-1980 de dados de precipitação pluvial da Agencia Nacional de Águas – ANA observou-se que os meses mais secos (setembro a fevereiro) apresentaram um subtotal de precipitação média, de 310,58 mm; correspondendo a 25,16 % do total anual, enquanto que os meses mais chuvosos apresentaram um subtotal de 923,69 mm; que corresponde a 74,84 % do total anual de precipitação na região (Tabela 1). Diante disto utilizando descrição feita por Cardim (2003), foi possível determinar o período seco e chuvoso no Estado de Alagoas e realizar a escolha dos meses que serão demonstradas as análises variograficas.

Tabela 1 – Média mensal da precipitação para o estado de Alagoas, durante o período de 1965-1980, destacando os meses mais secos e os mais chuvosos.

MESES SECOS (mm)					
SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV
82,85	47,39	26,18	33,15	50,55	70,46
Mese seco = 2.12% do Total Anual*					
MESES CHUVOSOS (mm)					
MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO
93,99	146,39	200,56	196,57	188,86	97,32
Meses chuvosos = 16.25% do Total Anual*					
*Total Anual (soma do período 1965 – 1980) = 1.234,27mm					

A margem de oscilação entre os meses, em escala sazonal, não foi distante isso mostra que, no Estado ocorreu uma maior variação da precipitação espacialmente do que sazonalmente, podendo ser devido a fatores topográficos e climáticos. Observa-se ainda que o Novembro foi mês mais seco, com média de 26,18 mm que corresponde a 2,12 % do total do período seco e com radiação solar no valor 28,06 MJm⁻² o terceiro maior do período, inferior apenas a Dezembro e Janeiro. No período chuvoso, Maio foi o mês com maiores valores médios de precipitação pluvial com valores médios na ordem de 200,56 mm que corresponde a 16,25% do total (Tabela 1).

Observou-se, em janeiro as maiores oscilações em torno da média, e novembro com as menores oscilações, com um percentual de 14,6% ambos os meses de transição climática de passagem do período chuvoso para o período mais seco, ambos possuem respectivamente valores de radiação na ordem de 28MJm⁻², valores esses superiores aos encontrados por Tiba et al.(1999) quem foram entre 19 e 22 MJm⁻² para o Estado de Alagoas. Observou-se no mês de maio, valor médio de radiação solar global de 18,85 MJm⁻², Tiba et al. (1999) encontraram para o mesmo meses, de maio e novembro, respectivamente valores na ordem de 14 e 22 MJm⁻², valores esses, menores do que os encontrado nesse estudo.

Neste item, serão apresentadas as informações sobre os parâmetros dos melhores ajustes, bem como suas representações gráficas, referentes ao mês de maio e novembro. Consideraram-se os modelos teóricos mais utilizados, para realizar o ajuste do variograma experimental, através dos modelos: esféricos, exponenciais e gaussianos; devido serem os que melhor representam as análises variográficas da dependência espacial entre as estações.

A tendência variográfica de maio ajustou-se melhor aos modelos exponencial e esférico, com IDE de 100 e 98 %, respectivamente. A diferença fundamental entre o modelo esférico e o modelo exponencial é que este atinge o patamar apenas assintoticamente, enquanto que o modelo esférico o atinge no valor do alcance, podendo implicar em alcances maiores para o modelo exponencial, e com isso, mostrar um grau de influência maior nos pares, entre as estações (Vieira 1996). Estudos demonstram que, do patamar em diante considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença entre pares de amostras ($Var [Z(x) - Z(x+h)]$) torna-se invariável com a distância. Observa-se que o parâmetro da variância sempre se apresentará igual ao patamar, quando o efeito pepita for igual ou muito próximo a zero. Assim, o modelo escolhido para representar o cálculo do variograma deste mês foi o modelo de estrutura exponencial, com um patamar e variância estrutural de 1,277 e um alcance 0,647 (Tabela 2)

Tabela 2 – Parâmetros dos modelos teóricos ajustados ao variograma experimental normalizado da radiação solar global média para o mês de maio. (C_0 =Efeito Pepita, $C+C_0$ =Patamar, C =Variância Estrutural, a =Alcance, IDE%=Índice de Dependência Espacial).

Modelo	C_0	$C+C_0$	C	a	IDE (%)
					Cambardella (1994)*
Exponencial	$1,286 \cdot 10^{-10}$	1,277	1,277	0,647	100
Esférico	$1,983310^{-5}$	1,5304	1,5004	0,374	98
Gaussiano	0,1145	1,3040	1,1695	0,322	80

*cálculos sugeridos por Cambardella et al. (1994)

Embora o modelo gaussiano tenha apresentado os menores valores no erro absoluto, observou-se que, no mês de maio o modelo exponencial proporcionou melhores resultados na

validação cruzada para o método de interpolação, Krigagem Ordinária, com menores valores de σ (desvio padrão do erro). Deste modo, o variograma para o mês de maio foi representado através do modelo exponencial, como observado na Figura 10. É importante salientar que, o σ é mais condizente com a estrutura dos gráficos da validação cruzada, do que os valores do erro absoluto, percebendo-se que, quanto menor o desvio padrão do erro, mais sobrepostos estavam os pontos dos dados observados e previstos.

Isto pode ser constatado na Figura 11 através da validação cruzada pelo método “*Leave one Out*”, correspondente ao modelo variográfico ajustado, observou-se também que a re-utilização dos dados interpolados validados pelo método “*Double Kriging*”, para serem utilizados como dados de entrada em outros modelos possui erros insignificantes, demonstrando assim a eficiência do método com ajuste variografico satisfatório (Figura 13).

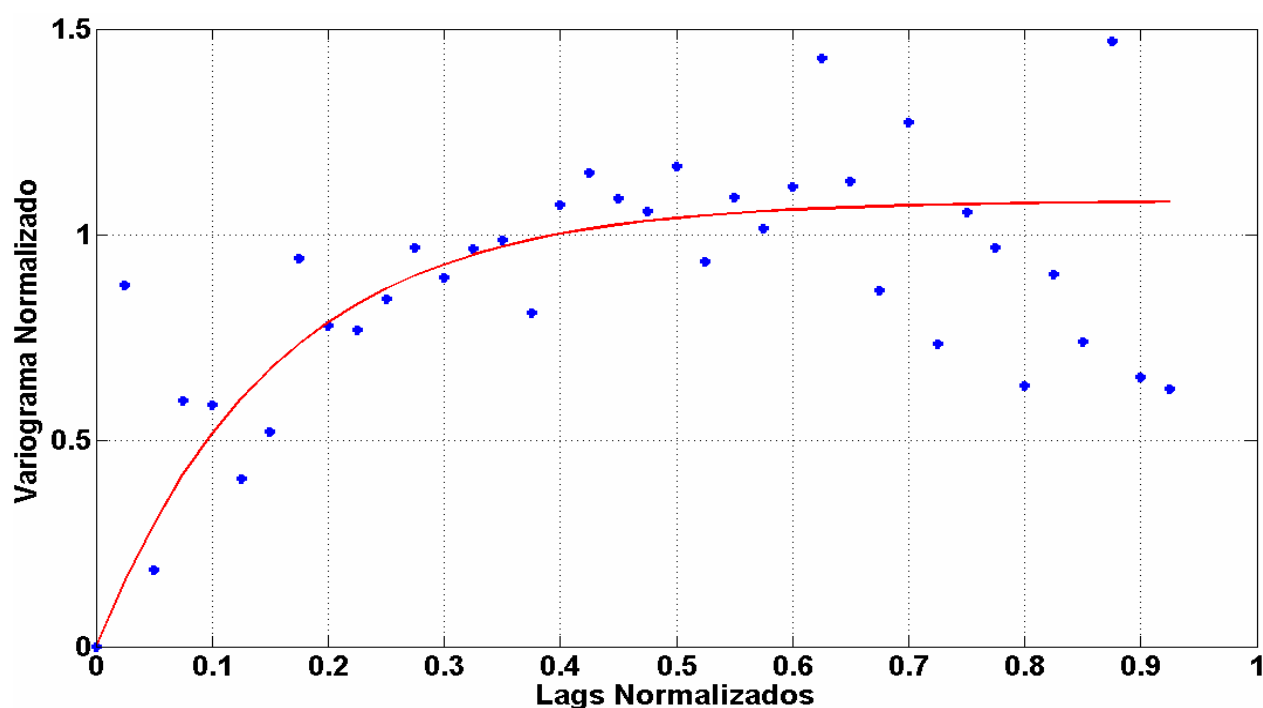


Figura 10 – Modelo exponencial ajustado ao variograma da Radiação Solar Global para o mês de maio no Estado de Alagoas.

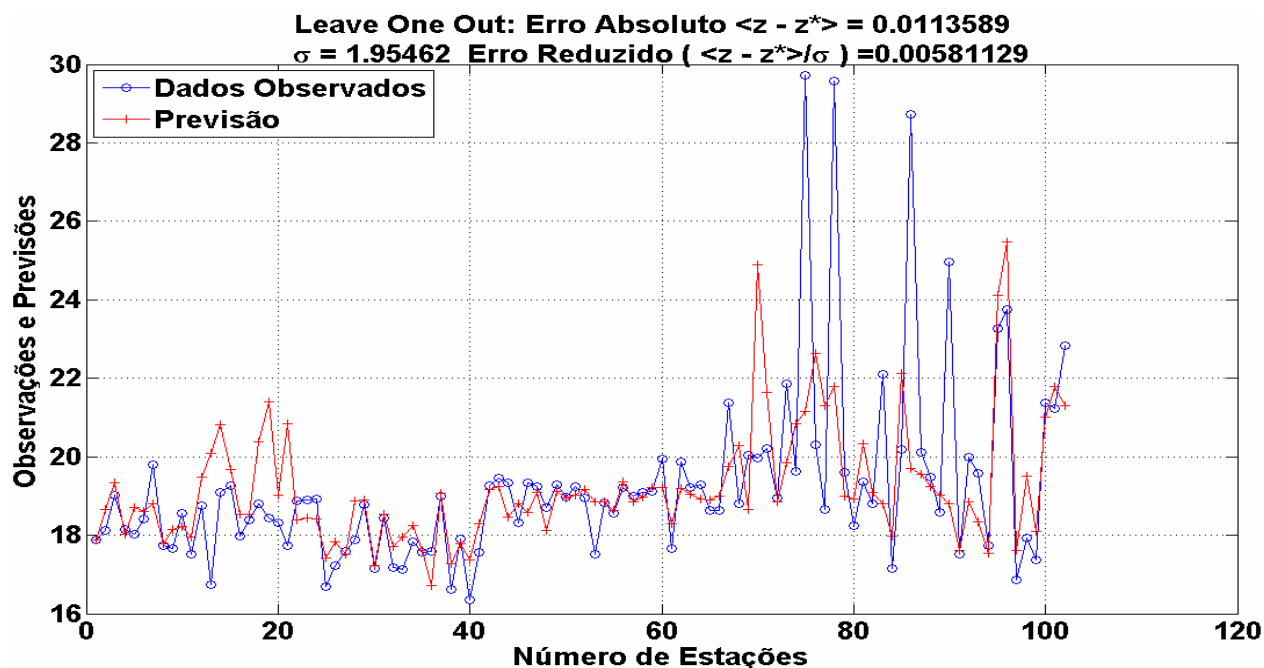


Figura 11 – Validação cruzada pelo método “*Leave one Out*”, correspondente ao melhor modelo variográfico ajustado da Radiação Solar Global, para o mês de maio do estado de Alagoas.

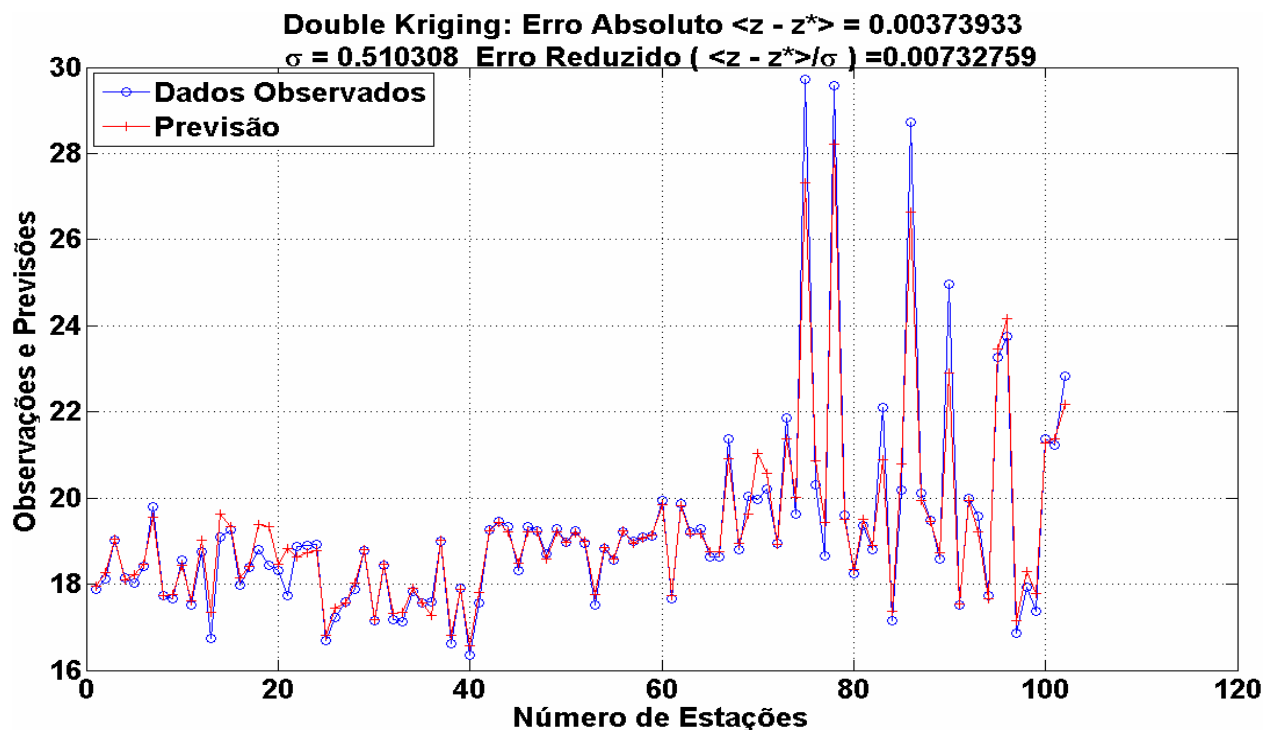


Figura 12 – Validação cruzada pelo método “*Double Kriging*”, correspondente ao melhor modelo variográfico ajustado da Radiação Solar Global, para o mês de maio do estado de Alagoas.

O modelo que apresentou melhor dependência espacial dos dados para mês de novembro também foi o exponencial (Tabela 3). Lamparelli et al. (2001) descreve que o modelo Exponencial cresce devagar, da origem para o patamar, e não se pode dizer que o modelo atinge realmente o patamar, como pode ser verificado na Figura 13. Segundo Carvalho (1997), na prática, considera-se o valor de “a” onde o variograma atinge 95% do patamar.

Conforme os cálculos realizados, os parâmetros ajustados no modelo exponencial apresentaram indicativos de forte dependência espacial entre os dados deste mês, onde o efeito pepita foi pequeno, na ordem de 0,11, e o patamar significativamente maior que o efeito pepita, na ordem de 1,194 na escala do variograma. O modelo exponencial apresentou-se com menor índices de dependência espacial para todo o período estudado.

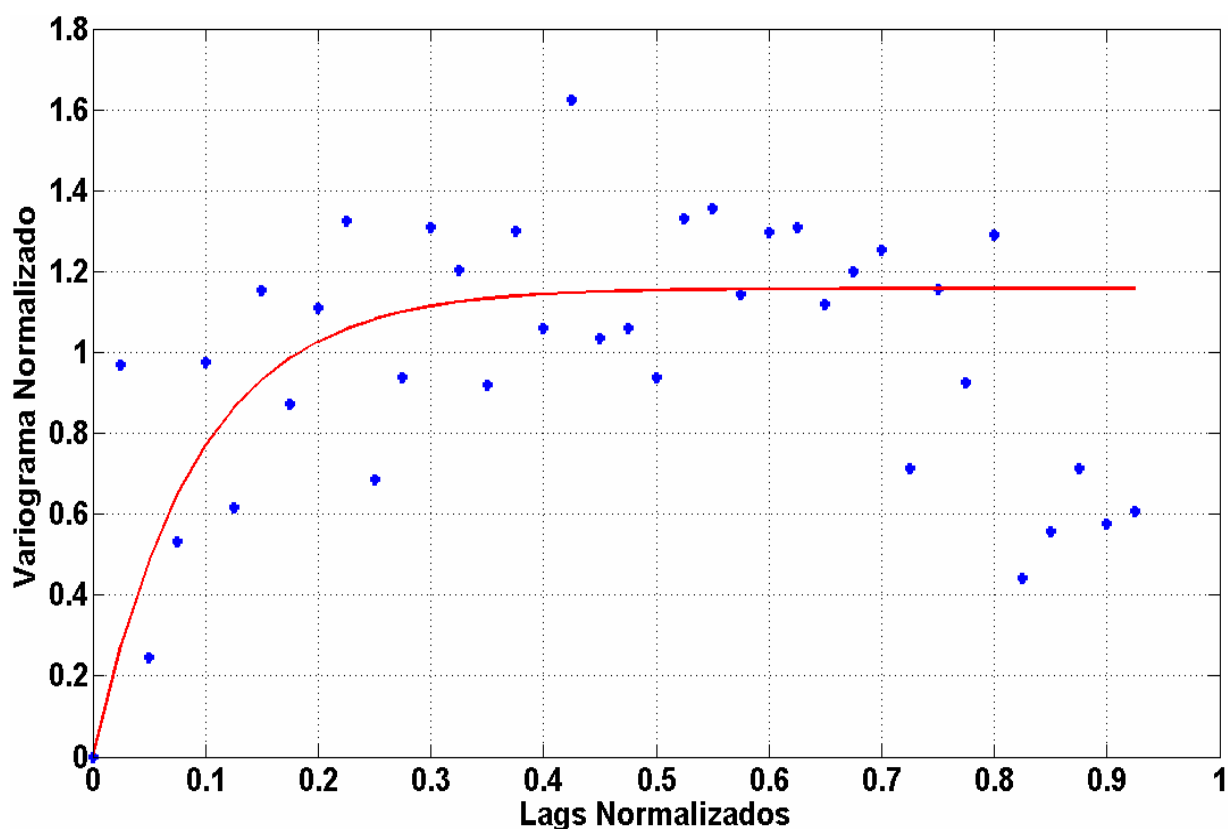


Figura 13 – Modelo exponencial ajustado ao variograma da Radiação Solar Global para o mês de novembro do estado de Alagoas.

Em todos os meses estudados pôde-se verificar que a dependência espacial dos dados originais foi elevada. Isto pode ser confirmado pelos valores do efeito pepita, que oscilou na

ordem de 0 a 4,5% do valor do patamar durante todo o período. Em seu trabalho, Avalos (2003) encontrou o efeito pepita oscilando entre 0 e 6,8%.

Tabela 3 – Parâmetros dos modelos teóricos ajustados ao variograma experimental normalizado da radiação solar global média para o mês de novembro. (C_0 =Efeito Pepita, $C+C_0$ =Patamar, C =Variância Estrutural, a =Alcance, IDE(%)=Índice de Dependência Espacial).

Modelo	C_0	$C+C_0$	C	a	IDE (%)
					Cambardella (1994)*
Exponencial	0,1105	1,1947	1,0842	0,723	90,75
Esférico	0,1504	1,1633	1,0129	0,861	87,07
Gaussiano	0,3453	1,3188	0,9735	0,433	73,81

cálculos sugeridos por Cambardella et al. (1994)

Cambardella et al. (1994) consideram que a dependência espacial é elevada quando o efeito pepita é superiores a 25% do valor do patamar. Isso mostra que no estudo presente, o parâmetro (C_0) apresentou resultados satisfatórios, com pequenos percentuais nos modelos ajustados, representando forte dependência espacial entre os dados, lembrando-se que o efeito pepita pode ocorrer tanto devido a variações à pequena escala não detectadas pela rede de amostragem utilizada, como erros de medida. A pequena magnitude do efeito pepita durante os meses estudados parece refletir que o conjunto de dados utilizados foi o suficiente para detectar a estrutura da variabilidade espacial da radiação solar. Vale ressaltar que, em muitos casos, talvez em sua maioria, a sensibilidade do pesquisador em estudo e o conhecimento sobre a variável é de fundamental importância na escolha do modelo variográfico. Às vezes, é preferível selecionar um modelo com um índice de dependência espacial (IDE) um pouco menor, mas que represente melhor os dados. Da mesma forma que, nem sempre quando um modelo teórico parece visualmente ser indicado, o IDE corresponderá. Ao comparar o cálculo do IDE entre os modelos escolhidos para a interpolação dos dados, neste estudo, observou-se que em alguns casos, o modelo que apresentou visualmente o melhor ajuste, obteve um IDE inferior ao outro que não foi tão bom visualmente, e vice-versa. De modo geral, quanto mais simples puder ser o modelo ajustado, melhor, e também não se deve dar importância excessiva a pequenas flutuações. Diante disto o modelo exponencial foi utilizado como modelo padrão, visto que o modelo se ajustou

muito bem a quase todos os meses, e assimilou bem a distribuição nos dois casos extremos aqui mostrados.

Percebeu-se também que no mês de novembro, quanto menor o desvio padrão do erro, mais sobrepostos estavam os pontos dos dados observados e previstos. Isto pode ser constatado na Figura 14 através da validação cruzada pelo método “*Leave one Out*”, correspondente ao modelo variográfico ajustado. Observou-se pelo método “*Double Kriging*”, que a re-utilização dos dados interpolados validados, podem ser aplicados como dados de entrada em outros modelos, possuindo erros aceitáveis, demonstrando assim a eficiência do método e o bom ajuste variográfico (Figura 15).

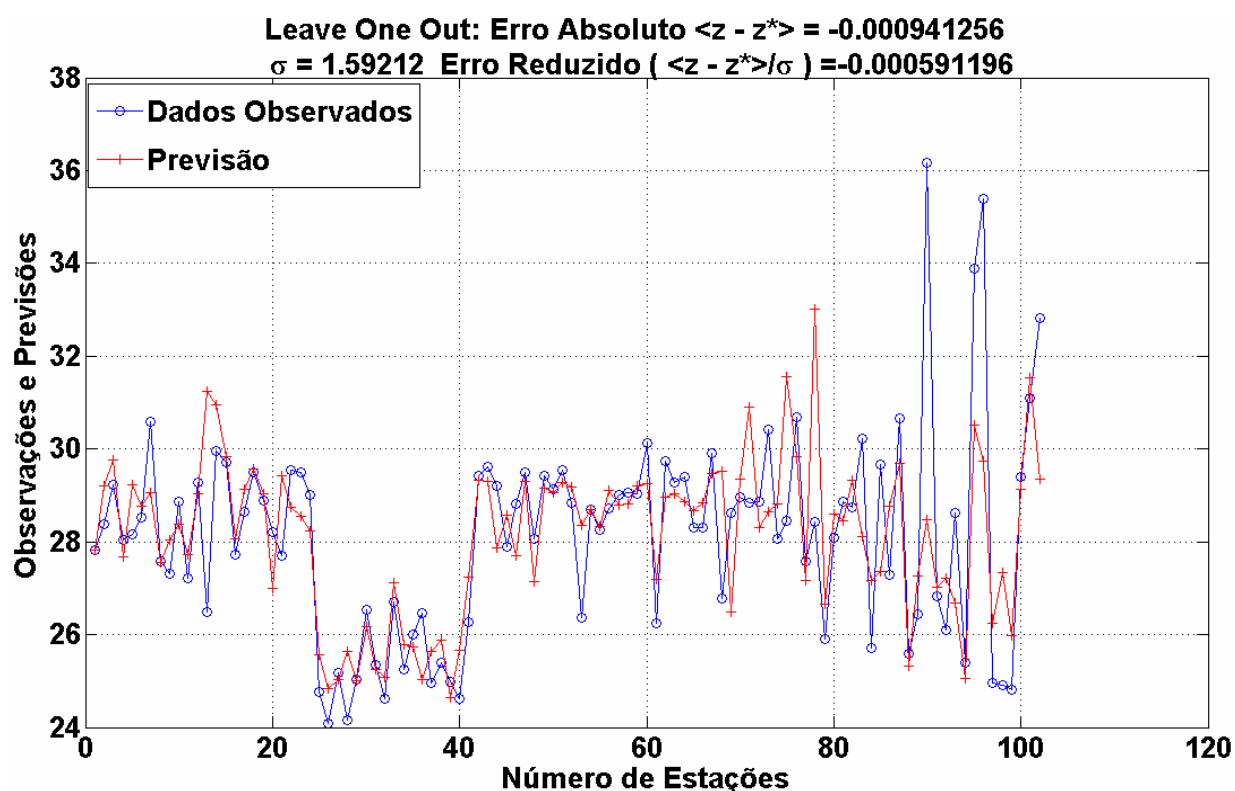


Figura 14 – Validação cruzada pelo método “*Leave one Out*”, correspondente ao melhor modelo variográfico ajustado da Radiação Solar Global, para o mês de novembro do estado de Alagoas.

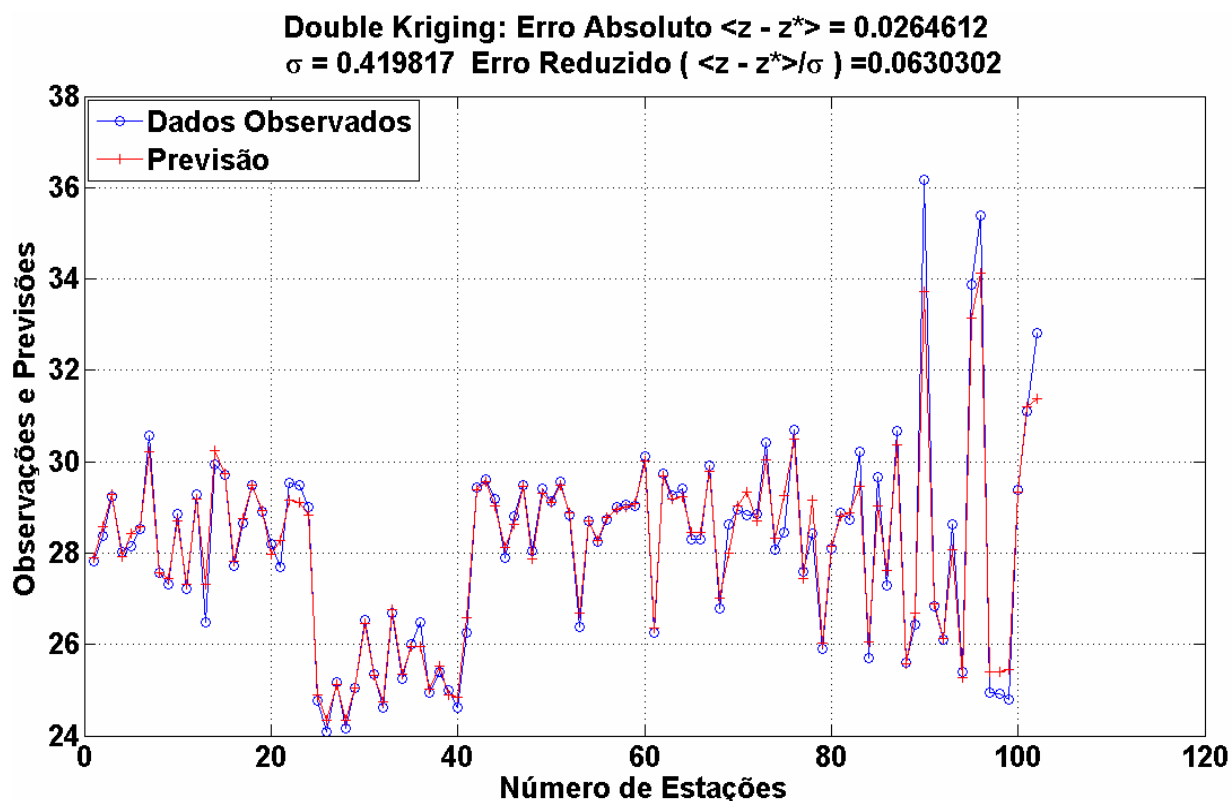


Figura 15 – Validação cruzada pelo método “*Double Kriging*”, correspondente ao melhor modelo variográfico ajustado da Radiação Solar Global, para o mês de novembro do estado de Alagoas.

4.3. ANÁLISE ESPACIAL DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL

A distribuição da radiação solar global, durante o período úmido (Setembro-Fevereiro), e do período seco (Março-Agosto), permite observar um gradiente positivo do litoral para o continente, com valores entre 13 a 18 MJm⁻² no meses de Maio a Julho, ou seja durante a os 3 últimos meses da quadra chuvosa, onde esses valores são observados na região do Agreste Alagoano. Observa-se no interior do estado, principalmente na região do Agreste, os maiores valores de radiação solar global. Nota-se o deslocamento sazonal dos núcleos encontrados no interior do Estado com valores entre 27 e 30 MJm⁻², durante o período de Janeiro a Março, com gradiente no sentido sertão- agreste, repetindo-se, entretanto com gradiente no sentido agreste-sertão com valores entre 29 e 25 MJm⁻², sinalizando uma variação sazonal.

Observa-se em todo o período da região do sertão – especificamente nas cidades de Água Branca, Inhapi, Mata Grande e Pariconha, cidades com altitude em torno de 500m, e região

de Microclima – semelhança dos valores com os encontrados em outras regiões, principalmente com o Litoral e com cidades da Zona da Mata, onde se obteve valores na ordem de 26 MJm⁻² nos meses secos, e entre 15 e 21 MJm⁻² nos meses úmidos de Abril a Agosto.

Valores mínimos, na ordem de 13 MJm⁻² são observados nos meses de Junho e Julho (inverno no hemisfério sul) principalmente na região do Agreste, principalmente nas cidade de Feira Grande e Mar Vermelho com altitudes de 280 e 542 m respectivamente. Estes valores são semelhantes ao encontrados na regiões de altitude no Sertão Alagoano, onde se caracteriza uma região de microclima no estado com altos níveis de pluviométrico, valores nesta ordem são comumente encontrados em na região Sul do Brasil como citado por Tiba (2000). Diante disto observa-se que os modelos utilizados tem sua estimativa intimamente relacionada com a variação da altitude, e da variação sazonal das temperaturas mínimas e máxima.

Analisando o Litoral do estado, região de tabuleiro costeiros, observa-se durante todo o período um gradiente no sentido litoral-continente, com isolinhas paralelas com valores na ordem de 27 MJm⁻² (Janeiro-Fevereiro), e entre 21 e 28 MJm⁻² durante os meses de Setembro-Dezembro. Valores mínimos são encontrados entre os meses de Abril a Agosto, meses correspondentes a quadra chuvosa do Estado de Alagoas, na ordem de 22 e 18 MJm⁻².

Uma análise mensal da cartas de isolinha de radiação solar global, observa-se regiões claramente diferenciadas, com grande destaque na região da Litoral e Zona Mata, correlacionado razoavelmente bem com as condições pluviométrica como já citado. As cartas de radiação solar global apresentam-se coerentes com os dados observados na região do Litoral (Maceió) e comparando-se com valores encontrados nas cartas do Atlas Solarimetrico do Brasil, dentro das condições estabelecidas na metodologia deste trabalho.

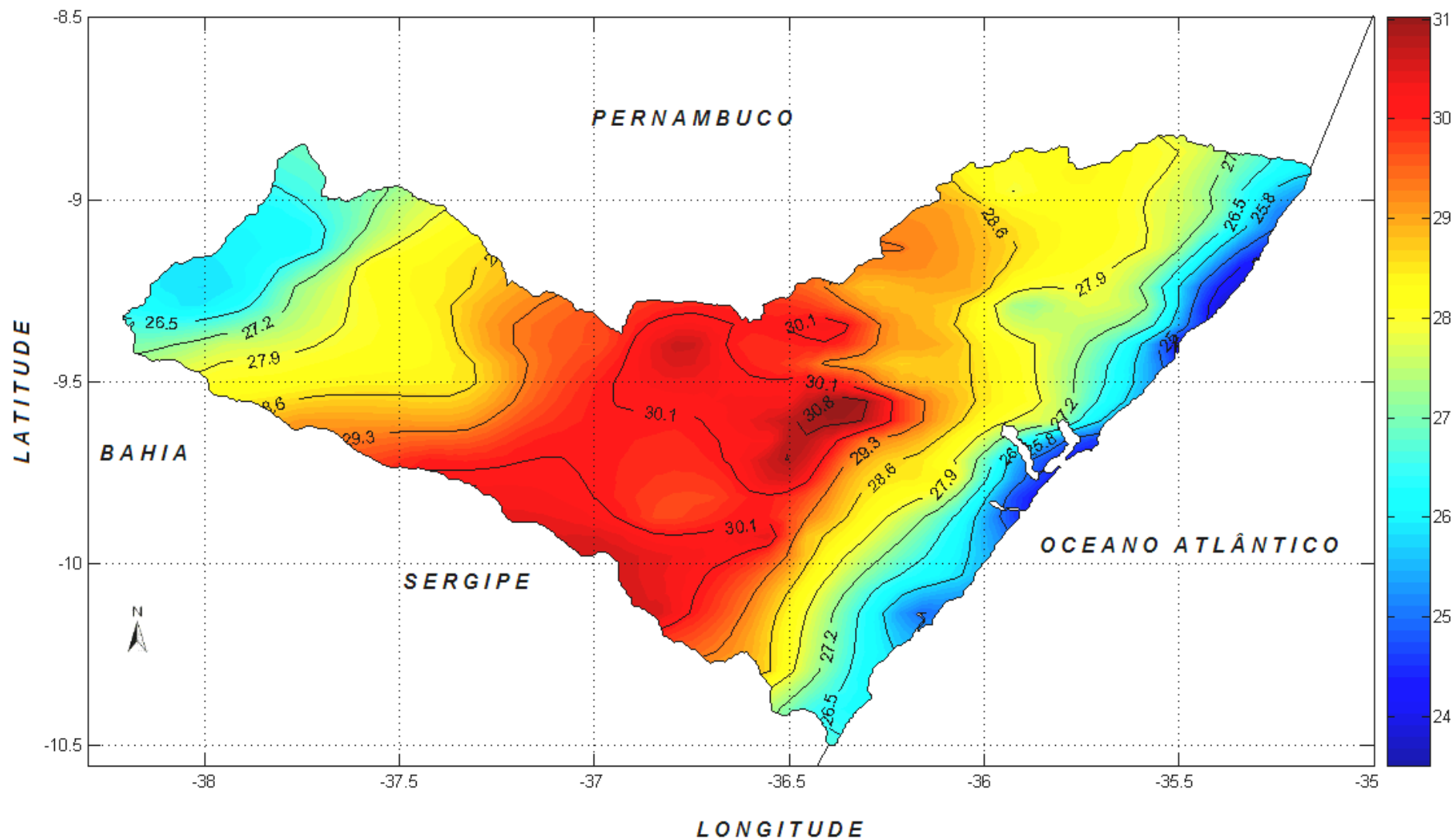


Figura 16 – Distribuição Espacial da Radiação Solar Global em MJm^{-2} correspondente ao mês de JANEIRO para o estado de Alagoas.

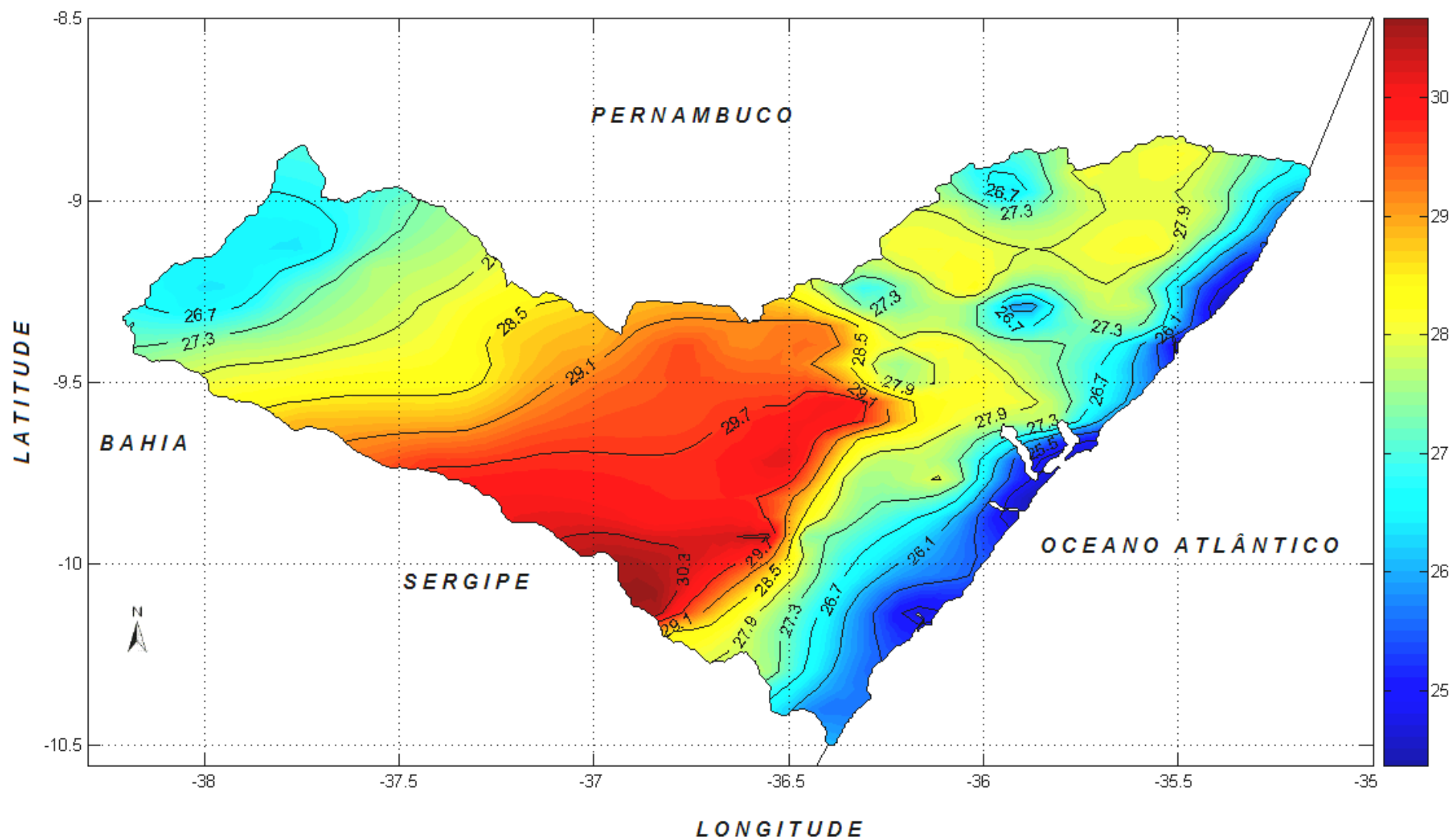


Figura 17 – Distribuição Espacial da Radiação Solar Global em MJm^{-2} correspondente ao mês de FEVEREIRO para o estado de Alagoas.

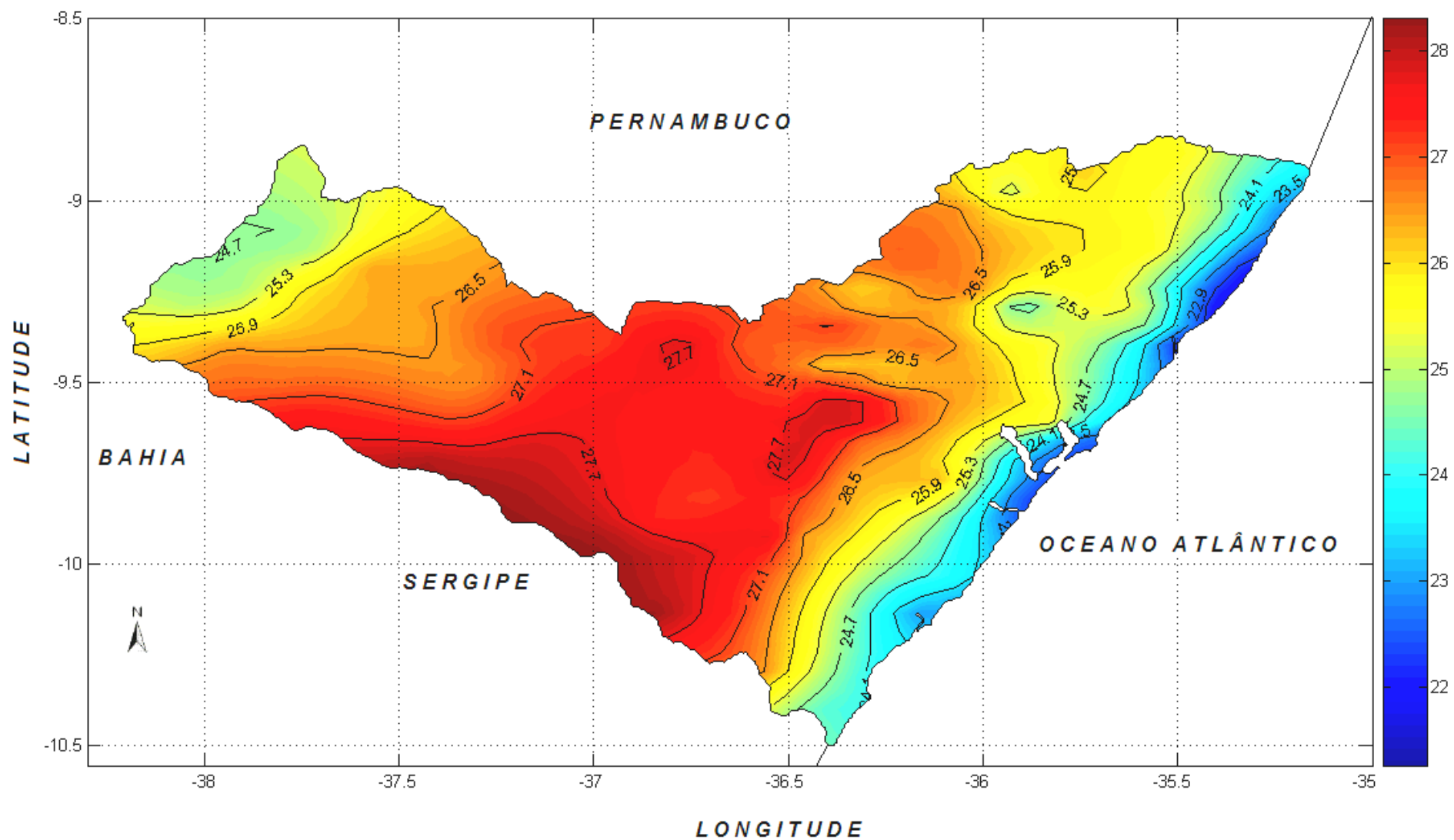


Figura 18 – Distribuição Espacial da Radiação Solar Global em MJm^{-2} correspondente ao mês de MARÇO para o estado de Alagoas.

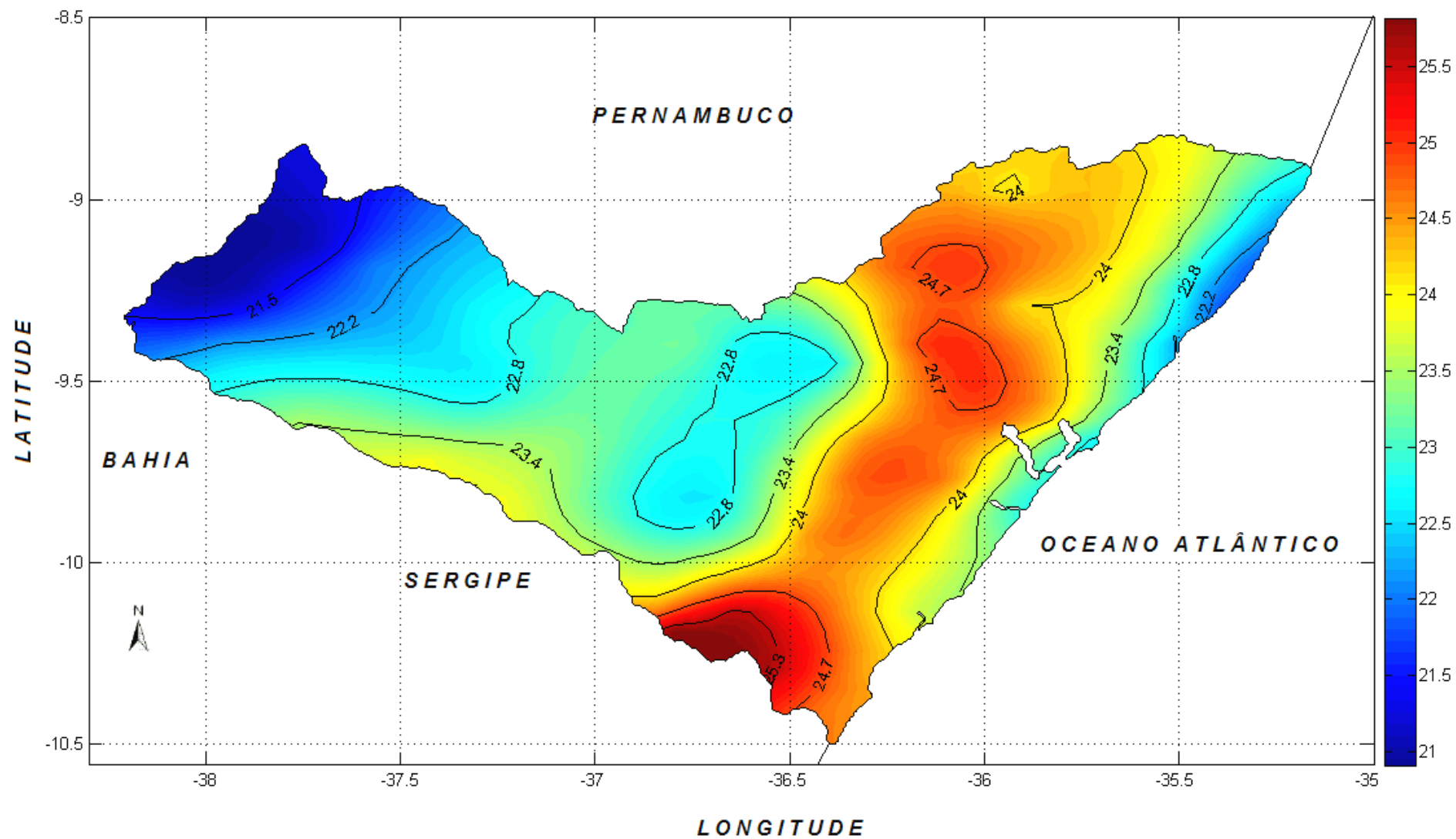


Figura 19 – Distribuição Espacial da Radiação Solar Global em MJm^{-2} correspondente ao mês de ABRIL para o estado de Alagoas.

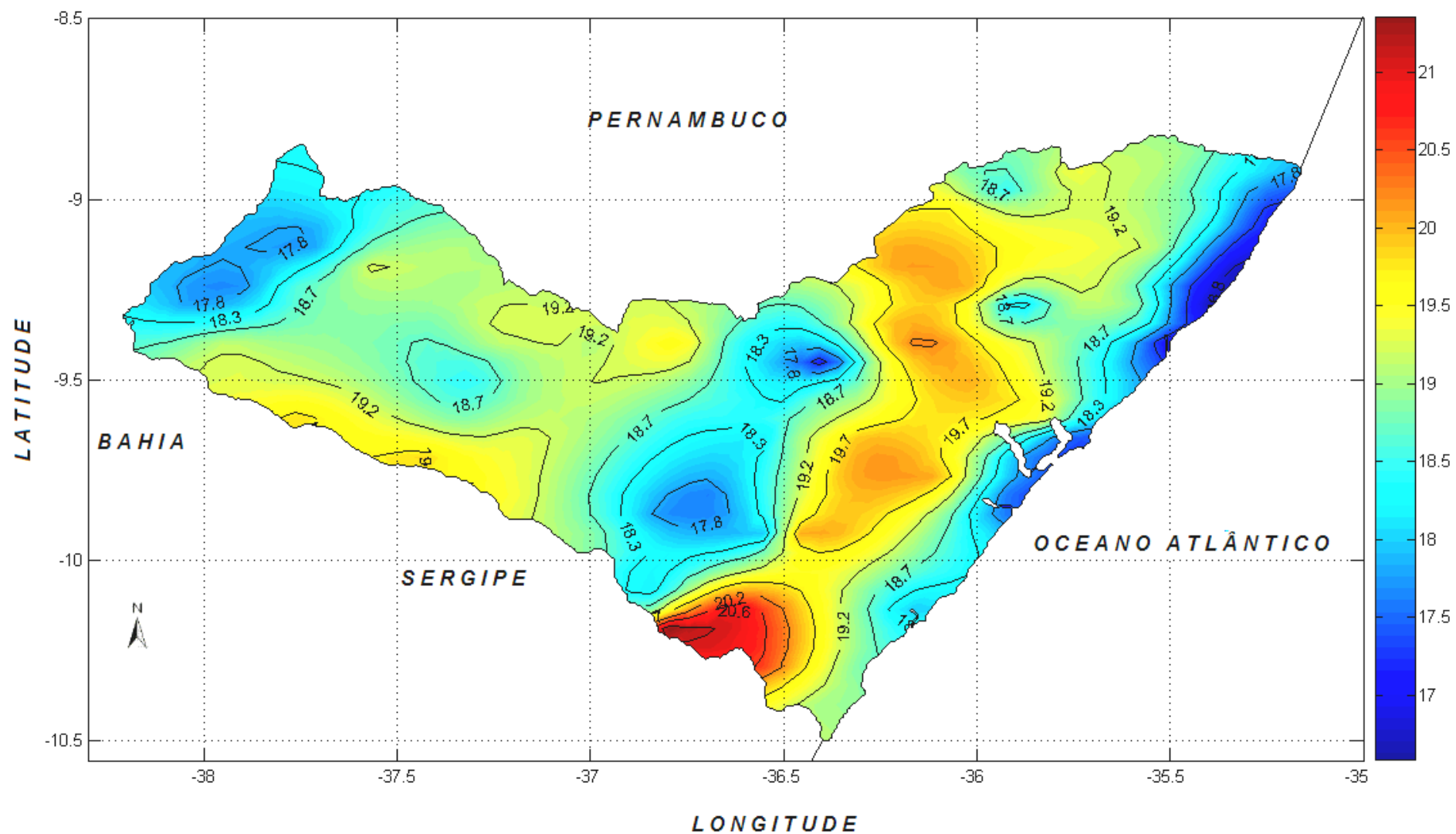


Figura 20 – Distribuição Espacial da Radiação Solar Global em MJm^{-2} correspondente ao mês de MAIO para o estado de Alagoas.

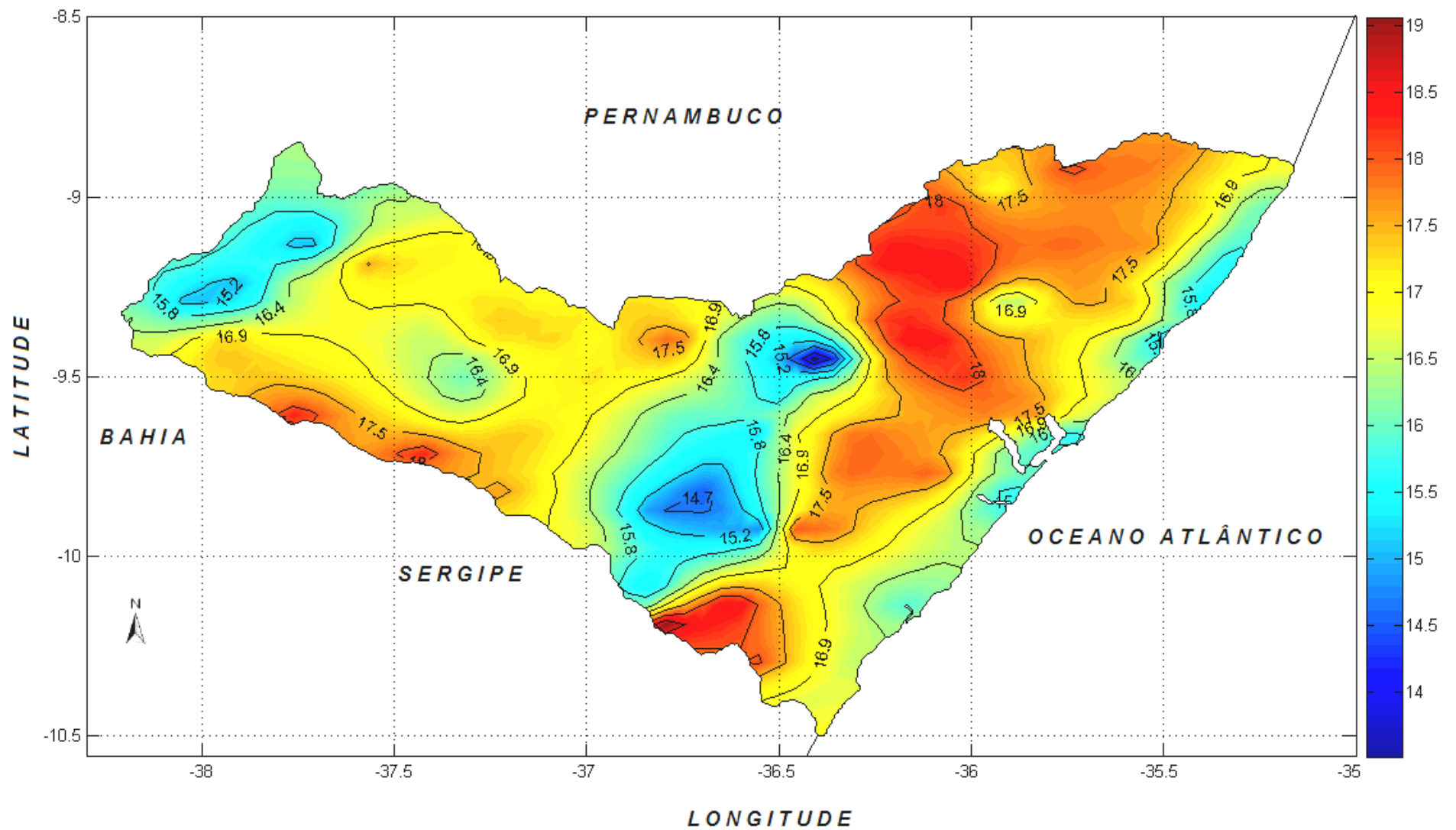


Figura 21 – Distribuição Espacial da Radiação Solar Global em MJm^{-2} correspondente ao mês de JUNHO para o estado de Alagoas.

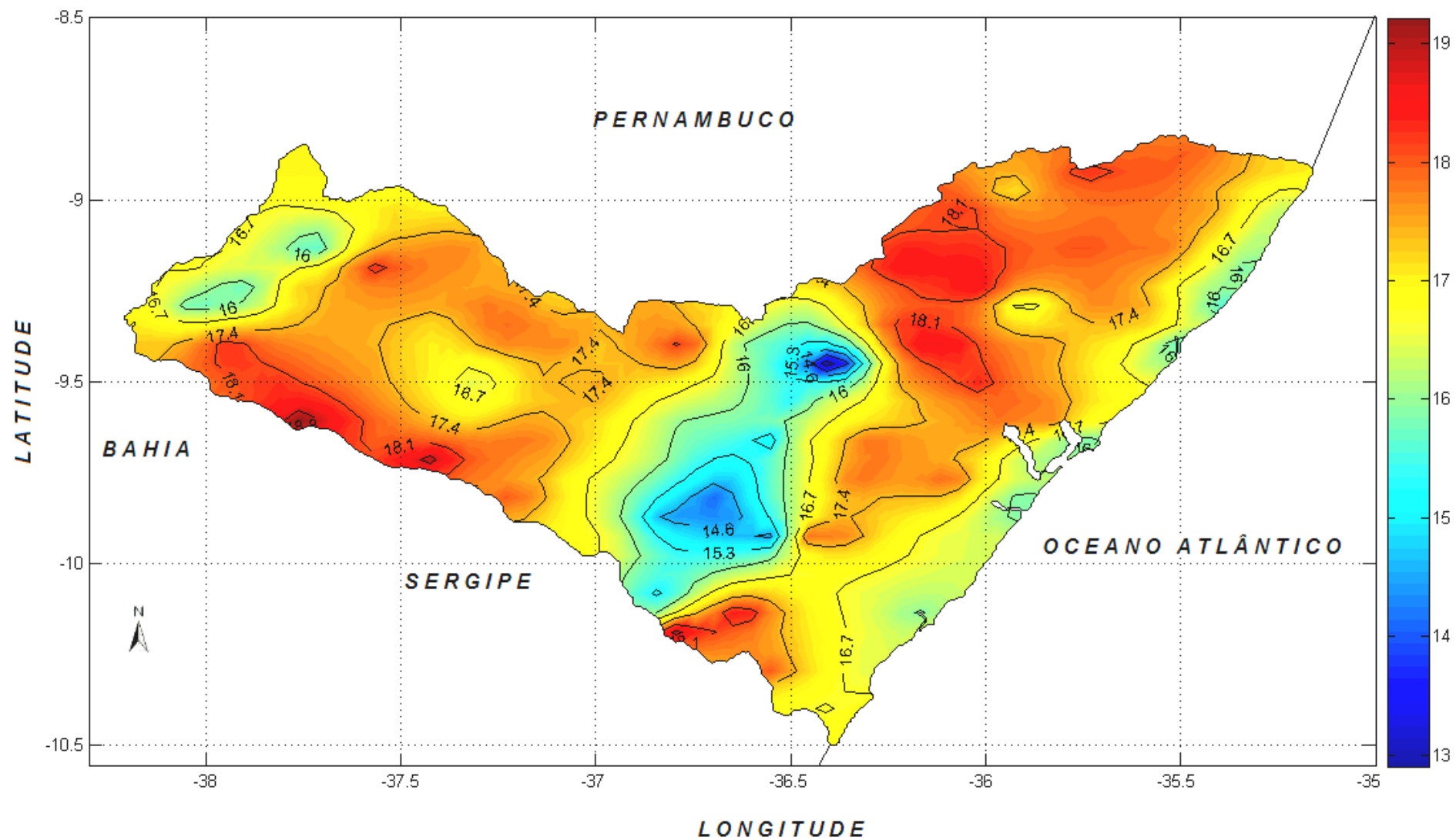


Figura 22 – Distribuição Espacial da Radiação Solar Global em MJm^{-2} correspondente ao mês de JULHO para o estado de Alagoas.

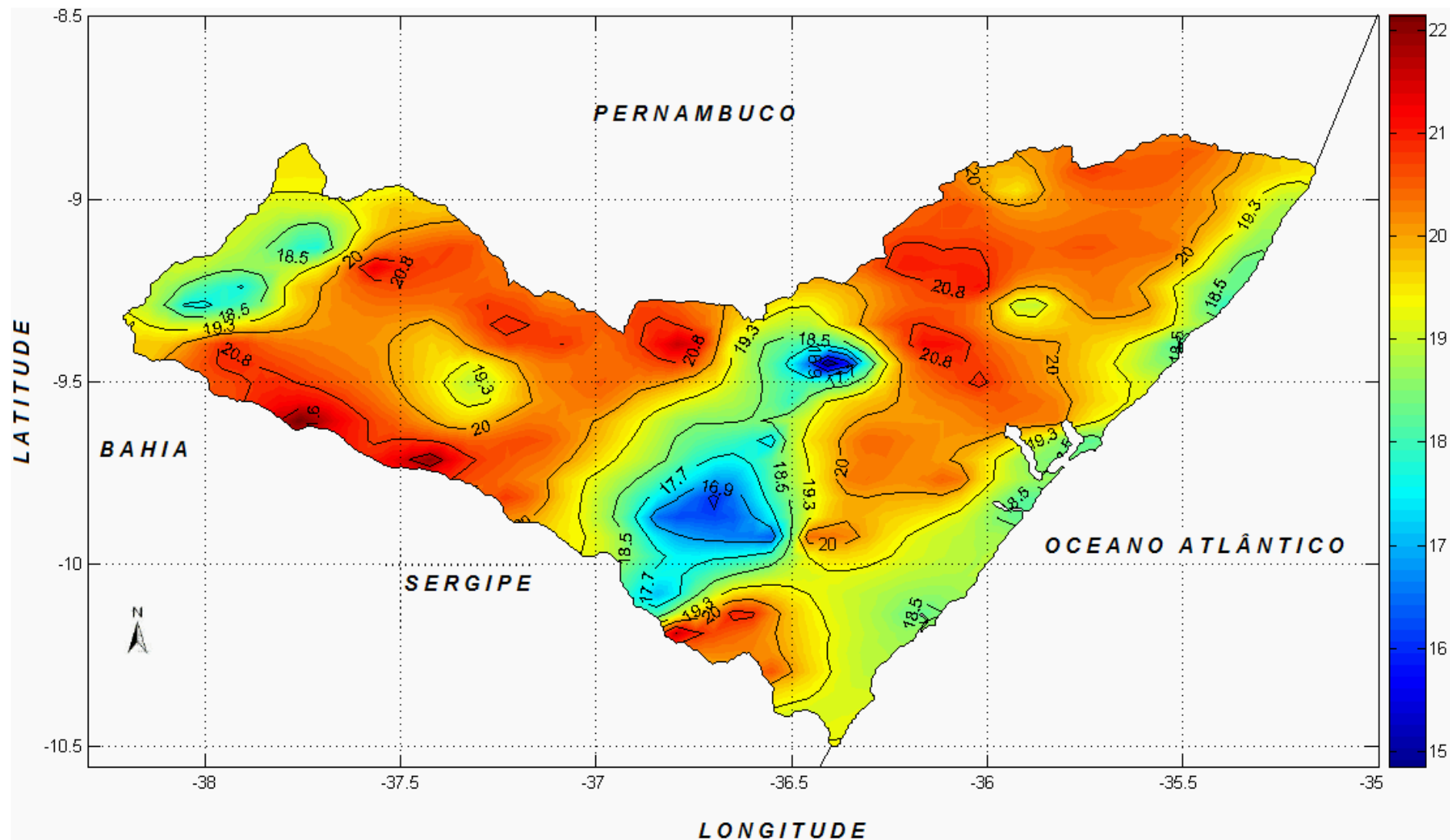


Figura 23 – Distribuição Espacial da Radiação Solar Global em MJm^{-2} correspondente ao mês de AGOSTO para o estado de Alagoas.

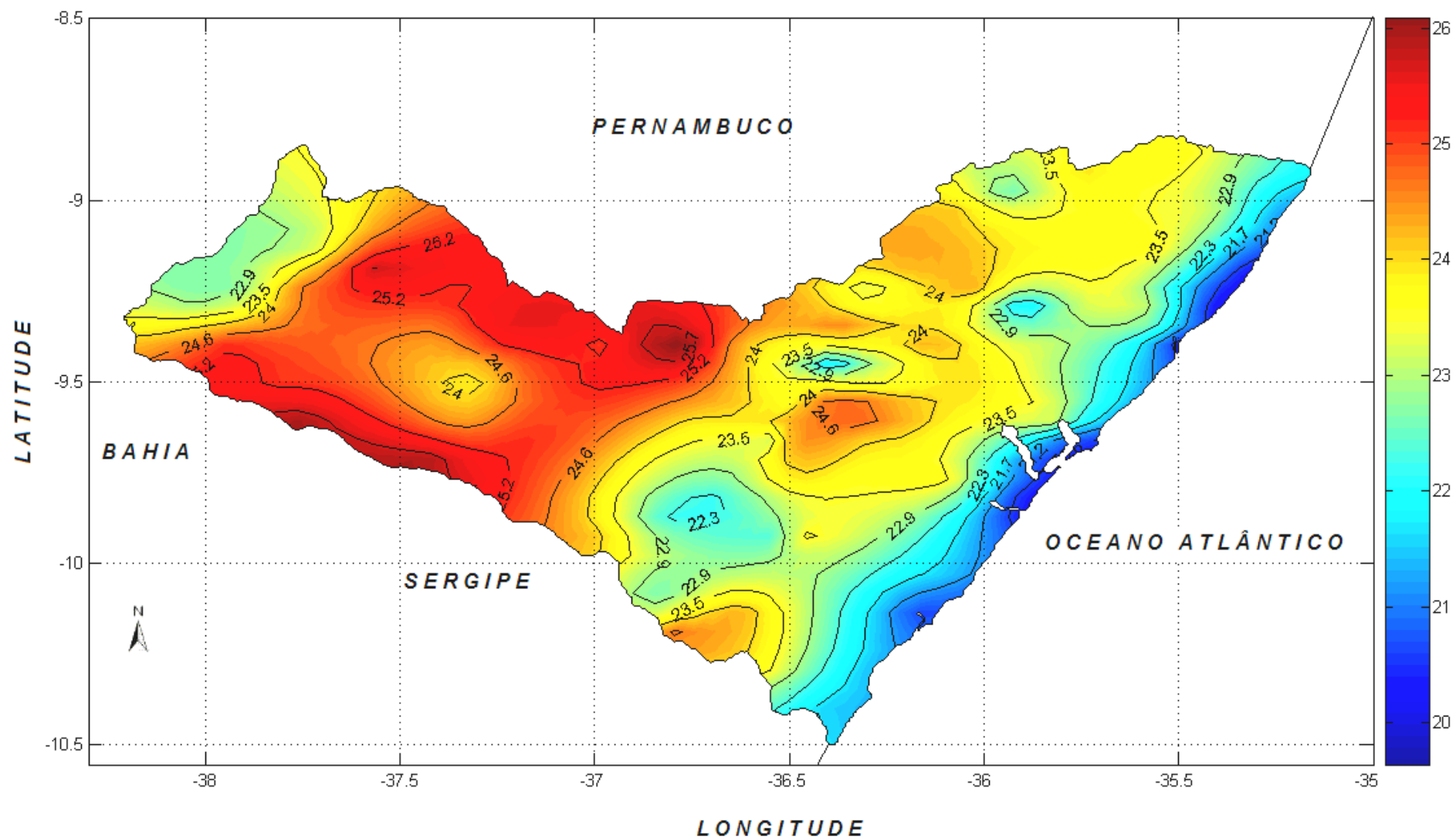


Figura 24 – Distribuição Espacial da Radiação Solar Global em MJm⁻² correspondente ao mês de SETEMBRO para o estado de Alagoas.

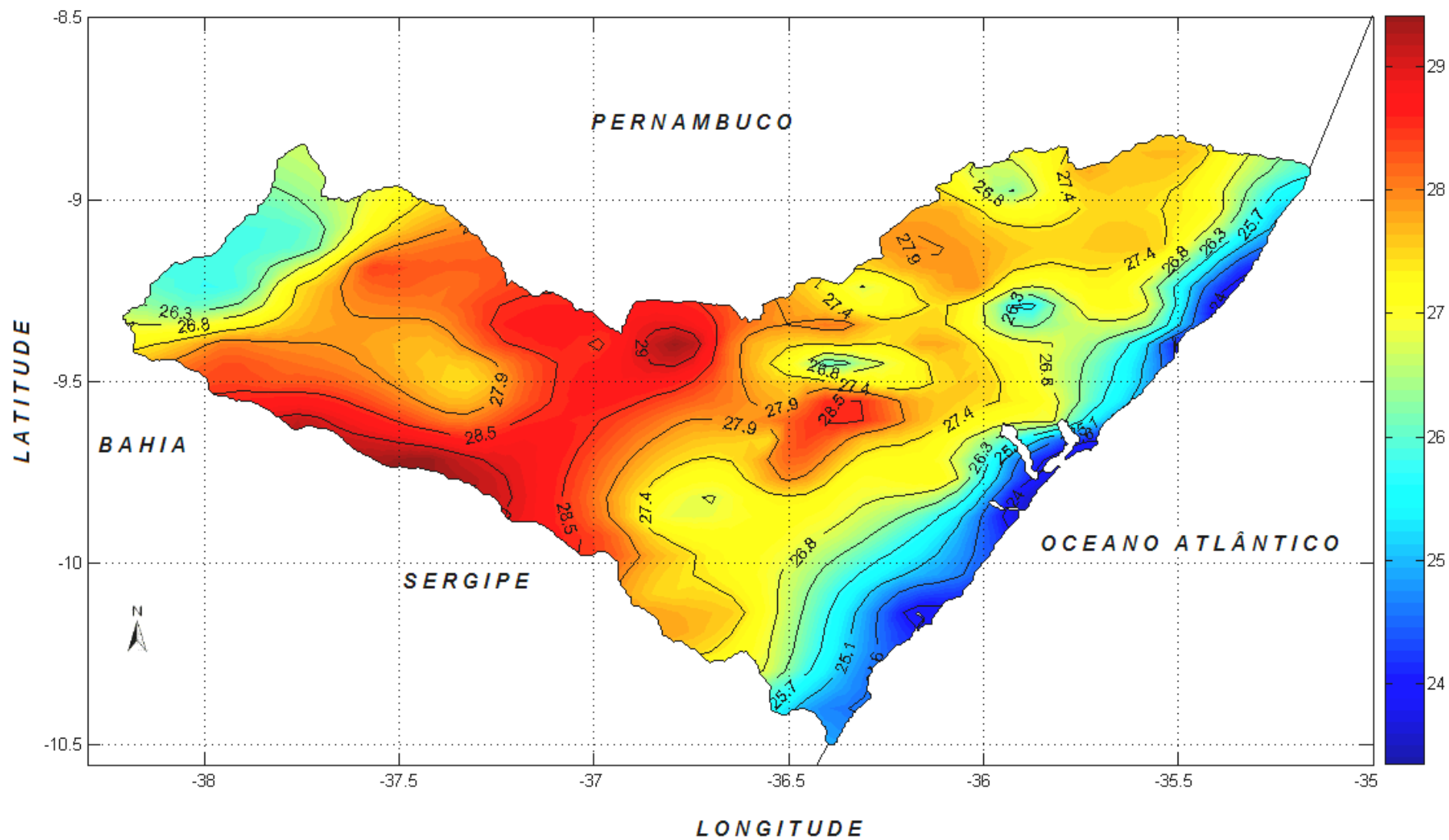


Figura 25 – Distribuição Espacial da Radiação Solar Global em MJm^{-2} correspondente ao mês de OUTUBRO para o estado de Alagoas.

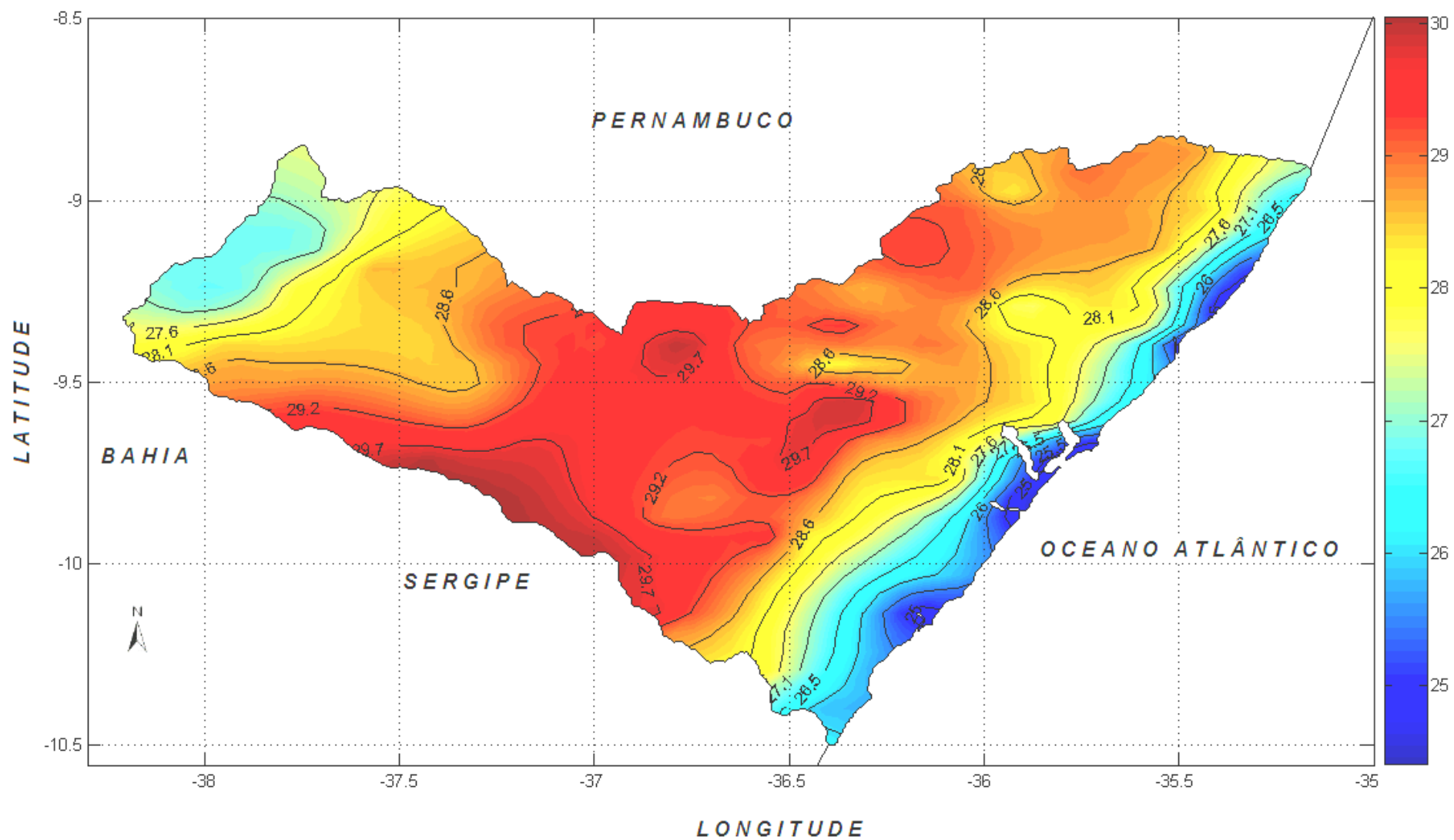


Figura 27 – Distribuição Espacial da Radiação Solar Global em MJm^{-2} correspondente ao mês de DEZEMBRO para o estado de Alagoas.

5. CONCLUSÕES

O modelo de Allen modificado por Nicácio (2002), não apresenta resultado satisfatório quando aplicado a estimativa da radiação solar global para toda área do Estado de Alagoas, mostrando valores superestimados nas regiões continentais, chegando a superar os valores da radiação no topo da atmosfera. Entretanto mostra-se adequado para estimar em locais próximos a costa.

A análise variográfica mostrou que todas as características estudadas dos procedimentos apresentam-se estruturadas espacialmente, ou seja, existiu uma função estrutural, com variância de comportamento modelável. Para essas características avaliadas, o modelo exponencial ajusta-se satisfatoriamente aos semivariogramas experimentais. Todos os gráficos dos variogramas utilizados para posterior estimativa espacial da precipitação média do Estado de Alagoas, através dos interpoladores geoestatísticos – apresentam forte dependência espacial entre a distribuição espacial dos dados utilizados. Portanto, em todos os meses, pôde-se observar que os modelos que apresentam melhores ajustes se enquadram perfeitamente dentro dos limites de forte dependência espacial

As estimativas da radiação solar global, obtidas pelos métodos interpoladores apresentam resultados satisfatórios, sendo condizentes com as características locais da região, tanto na distribuição espacial quanto sazonalmente.

6. RECOMENDAÇÕES

Para sugestões e trabalhos futuros, baseado nos resultados, observa-se que:

- Medições nas áreas de transições climáticas das mesoregiões do Estado de Alagoas de forma seqüencial. No intuito de ajustar e avaliar o modelo de Allen (1997) assim como outros modelos, obtendo-se uma estimativa espacial com melhor qualidade.
- Implantar uma rede densa de medidas solarimétricas, principalmente de medidas de brilho solar, no intuito de ajustar e avaliar outros modelos que utilizam essa grandeza, refinando o mapeamento nos locais aonde o modelo de Allen (1997) ou Allen modificado (Nícácio, 2002) não obtiveram desempenho satisfatório.
- Aplicação da geoestatística para estudo de variabilidade temporal da radiação solar ou de outras grandezas meteorológicas, uma vez que a predição de grandezas temporais é uma área de grande interesse na meteorologia.
- Utilização de outras técnicas geoestatísticas, como: cokrigagem, krigagem com tendência externa, entre outros métodos que utilizam duas variáveis para o cálculo de interpolação.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, R., Climatic synthetic series for the Mediterrabean belt, The European Commission, on Nuclear Energy Programme Joule III, Contract JOR3-CT96-0042, **Final Report, Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial**, Lisboa, Portugal, 1997.

AHMAD, I., AL-HAMADANI, N. E IBRAHIM, K. **Solar Radiation maps for Iraq**. Solar Energy. v. 31. n°. 1. pp. 29-44, 1983.

ARMSTRONG, M. E CARIGNAN, J. **Géostatistique Linéaire, Application au Domaine Minier**. École de Mines de Paris, Géostatistique Linéaire, Application au Domaine Minier, École de Mines de Paris, 112 p, 1997.

ANGSTROM, A. **Solar and terrestrial radiation**. Quartely Journal Research Meteorologycal Society. p. 121-126, 1924.

ALLEN, R. **Evaluation of procedures of estimating mean monthly solar radiation from air temperature**. Fao, Rome, 1995.

ALLEN, R. **Self-calibrating method for estimating solar radiation from air temperature**. Journal Hydrological Engineering, v.2, p. 56 –67, 1997.

AVALOS, J. M. M. **Estimacion y Simulacion de la precipitacion en Galicia a Escala Mensual. Tese de Doutorado**. Universidade da Coruña, España. 2003.

BALLING, R. C. E VOJTESAK, M. **Solar climates of the United States based on longterm montly averaged daily insolation values**. Solar Energy. v. 31. n3. p. 283-291, 1983.

BALLING, R. C. **Harmonic analysis of monthly insolation levels in the United States**. Solar Energy. v. 31. n. 3. p. 283-291, 1983.

BATISTA, I. F. **Variabilidade espacial da umidade do solo em irrigação por gotejamento sob cultivo protegido**. Dissertação (Mestrado em Agronomia/ Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP – Campus de Botucatu, São Paulo, 113p, 2002.

BENNETT, IVEN., **Monthly Maps of Mean Daily Insolation for the United States**, Solar Energy, v. 9, nº 3, pp. 145 – 158, 1965.

BENNETT, I. **Frequency of daily insolation in Anglo North America during June and December**, Solar Energy, v. 11, nº 1, p.41-55, 1967.

BRAGA, L.P.V. **Geoestatística e aplicações**. Depto. de Métodos Estatísticos, UFRJ, 36p, 1990.

CAMBARDELLA, C.A., MOORMAN, T.B., NOVAK, J.M., PARKIN, T.B., KARLEN, D. L., TURCO, R.F., KONOPKA, A.E. **Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils**. Soil Sci. Soc. Am. J., v.58, p.1501-11, 1994.

CARDIM, A. H. **Caracterização da estação de cultivo em Alagoas: Análise Temporal e Espacial**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), 103p, 2003, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas.

CARVALHO, M. S. **Aplicação de métodos de análise espacial na caracterização de áreas de risco a saúde**. Tese (doutorado em Ciências em Engenharia Biomédica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE-RJ, 149p, 1997.

CORÁ, C. A. G. **Distribuição de pesos e influência das variáveis na cokrigagem**. Dissertação (Mestrado do Instituto de Geociências da Unicamp), 132p, 1996.

CURRAN, P.J. E ATKINSON, P.M. **Geostatistics and Remote Sensing**, Progress in Physical Geography, v22, n1, p. 61-78, 1998.

CHAUVET, P. **Aide-Memoire de Géostatistique Minière**. École des Mines de Paris, 210p, 1994.

CHRISTAKOS, G. **A Bayesian maximum-entropy view to the spatial estimation problem**. Mathematical Geology, v.22, n.7, p.763-776, 1990.

CHRISTAKOS, G. **Random field models in earth sciences**. San Diego: Academic Press, 474 p, 1992.

CHRISTAKOS, G. **Modern Spatiotemporal Geostatistics**. New York: Oxford University Press, 288 p, 2000.

CHRISTAKOS, G.; BOGAERT, P.; SERRE, M.L. **Temporal GIS: Advanced Functions for Field Based Applications**. Heidelberg: Springer-Verlag, 217 p, 2002.

DAVIS, B. M. **Uses and abuses of cross-validation in geostatistics**. Mathematical geology. v.19, p. 241-248, 1987.

GEISERS, S. **The predictive sample reuse methods with application**. J. Am. Stat. Assoc., v.70, p. 320-328, 1975.

GTES –Grupo de Trabalho de Energia Solar. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CRESESB. Rio de Janeiro, 1999.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics in soil science: state-of-art and perspectives**. Geoderma, v. 89, p. 1-45, 1999.

GOIS, G., SOUZA, J.L., TEIXEIRA-SILVA, P.R., OLIVEIRA JÚNIOR, J. F. **Caracterização da Desertificação no Estado de Alagoas utilizando variáveis climáticas**. Revista Brasileira de Meteorologia, v.20, n.3, 301-314, 2005.

GROSSI, G. **Evaluación a nivel de superficie de la radiación solar global en la republica Argentina.** Tese (Mestrado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais –INPE, 1997.

GUERRA, P. A. G. **Geoestatística Operacional.** Brasília. MME/DNPM, 145p, 1988.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation.** New York, Academic Press, 1983.

ISAAKS E CO. **A Spatial and Geostatistical Environment for Variography,** SAGE2001, San Mateo, California, <http://www.isaaks.com>, 67 p, 1999.

KESSLER, M. C. E CORBELL, O. D. **Mapas da Radiação Solar diária total média mensal sobre superfície horizontal para o Rio Grande do Sul para os 12 meses do ano.** Atas do 2º Congresso Latino-Americano de Energia Solar. v. 1. p. 61-80. João Pessoa – Paraíba, 1979.

KIMBAL, H. H. **Variations in the total and luminous solar radiation with geographical position in the United States.** Monthly Wearther Review, v. 47, n.11, p.769 – 793,1919.

LANDIM, P.M.B. **Análise Estatística de Dados Geológicos.** São Paulo: EDUNESP, Série Ciência e Tecnologia, 226p, 1998.

LAMPARELLI, R. A. C.; ROCHA, J. V.; BORGHI, E. **Geoprocessamento e agricultura de precisão: fundamentos e aplicações.** Série Engenharia Agrícola, vol II. Guaíba: Agropecuária, 118p, 2001.

LIMA, E. P. **Evapotranspiração de referência de Penman-Monteith, padrão FAO-1998, a partir de dados de temperatura máxima e mínima de Minas Gerais.** Viçosa, MG:UFV, 67p, 2005. Tese (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

LEENAERS, H., OHX, J. P., BURROUGH, P. A. **Comparison of spatial prediction methods for mapping floodplain soil pollution.** Catena, v. 17, p. 535-550, 1990.

LIU, D. L., SCOTT, B. J. **Estimating in Australia from rainfall and temperature observations.** Agricultural and Forest Meteorology, v. 106, p. 41-59, 2001.

McBRATNEY, A.B., HART, G.A., McGARRY, D. **The use of region partitioning to improve the representation of geostatistically mapped soil attributes.** J. Soil Sci., v. 42, p. 513-532, 1991.

MYERS, J. C. **Geostatistical error management. Qualifying uncertainty for enviromental sampling and mapping.** New York, Van Nostrand Reinhold, 571p, 1997.

NICÁCIO, R. M. Radiação Solar Global e Difusa em Maceió – Alagoas: Medidas e Modelos. Maceió, AL, 107p, 2002. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Alagoas.

OLADE. **Atlas de Climatologia Solar.** V. I. Quito – Equador, 1987.

PALIATSOS, A.G., KAMBEZIDIS, H.D., ANTONIOU, A. **Diffuse solar irradiation at a location in the Balkan Península.** Renewable Energy. V. 28, p. 2147-2156, 2003

PRESCOTT, J. A. **Evaporation from a water surface in relation to solar radiation.** Trans. R. Soc. Science Aust. v. 64, p. 114-118, 1940.

ROSSI, R. E., DUNGAN, J. L., BECK, L. R. **Kriging in the shadows: geostatistical interpolation for remote sensing.** Remote Sens. Environ., v.49, p. 32-40, 1994.

SAHIN, A. E HASSAN, H.M. **Enhancement of Permeability Variograms Using Outcrop Data.** The Arabian Journal for Sciences and Engineering, v.23, n. 1C, p.137-144, 1998.

SEBRAE. Disponível em http://www.sebrae.com.br/udl/acoes_alagoas.htm. Última atualização em outubro, 2003. Consulta realizada em 2004.

SEGAL, M. & DAVIS, J. **The impact of deep cumulus reflection on the ground-level global irradiance.** Journal Applied Meteorology, v. 31, p.217-222, 1992.

SERRE, M.L. **Environmental spatiotemporal mapping and groundwater flow modeling using the BME and ST methods.**236p, 1999. Tese (Doctor of Philosophy in Environmental Modeling) - School of Public Health, University of North Carolina, Chapel

SOUZA, J.L. **Irradiância solar no litoral do Nordeste: Avaliação Preliminar.** In: X Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 1997, Piracicaba. Anais ...Piracicaba: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, p457-459, 1997.

SOUZA, J.L., NICÁCIO, R.M., LIMA MOURA, M.A. **Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil.** Renewable Energy, v30, p1203-1220, 2005.

SUEHRCKE, H. **On the relationship between duration of sunshine and solar radiation on the earth's surface: Angstrom's equation revisited.** Solar Energy, v.68, n5, p417-425, 2000.

SUPIT, I. E VAN KAPPEL, R.R. **A simple method to estimate global radiation.** Solar Energy, v. 63, n. 3, pp. 147-160, 1998.

SCHUCANY, W. R. Sample reuse. In: Kotz, S., Johnson, N. L. **Encyclopedia of statistical science**, New York, John Wiley, p. 235-238, 1981.

TIBA, C., FRAIDENRAICH, N., LYRA, F.J.M., NOGUEIRA, A. M. de B., GROSSI GALLEGOS, H., MoSZKOWINCZ, M., CAVALCANTI, E.S.C. **Brazilian Solarimetric Atlas. Final Technical Report Vol I to IV**, Agreement N° 004 between the Federal University of Pernambuco (UFPE) and the Center for Energy Research (CEPEL), 1997.

TIBA, C., GROSSI GALLEGOS, H., FRAIDENRAICH, N., LYRA, F.J.M. **On the devevelopment of spatial/temporal solar radiation maps: Brazilian case study.** Renewable Energy, v 18, p.393-408, 1999.

TIBA, C. **O Recurso Solar no Brasil**. Tese (Doutorado em Energia Nuclear). Universidade Federal de Pernambuco -UFPE. 110p, 2000.

TIBA, C., FRAIDENRAICH, N., LYRA, F. J. M. E GALLEGOS, H. G. **Solar Energy Resource Assessment – Brazil**, Renewable Energy, v. 27, pp. 383-400, 2002.

TRAGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. **Application of geostatistics to special studies of soil properties**. Advance in Agronomy, Vol. 38, p45 – 94, 1985.

TSEGAYE, T., HILL, R. L. **Intensive tillage effects on spatial variability of soil test, plant growth and nutrient uptake measurements**. Soil Sci., v. 163, p. 155-165, 1998.

UZUMAKI, E.T. **Geoestatística Multivariada: estudo de métodos de predição**. Campinas. 104p, 1994. Dissertação (Mestrado em Estatística) - Instituto de Matemática, Estatística e Ciência de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

WONG, L.T. & CHOW, W.K. **Solar radiation model**. Applied Energy. v.69, p191-244, 2001.

YAMAMOTO, J.K. **An alternative measure of the reliability of ordinary kriging estimates**. Mathematical Geology, v.34, n.4, p.489-509, 2000.

ZAMBOTI, J. L. **Mapas pluviométricos médios mensais no verão para o Estado do Paraná, utilizando métodos geoestatísticos**. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 134p, 2001.

ZIMBACK, C.R.L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. Botucatu./SP Tese (Livre-Docência) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista. 114p, 2001.

APÊNDICE

APÊNDICE

A – CONCEITOS ESTATÍSTICOS BÁSICOS

CONCEITOS ESTATÍSTICOS

Foram utilizadas as medidas de tendência central, como: média, mediana, desvio padrão e variância, bem como, valor máximo e mínimo, e coeficiente de variação. Dessa forma, uma breve descrição dos cálculos estatísticos básicos utilizados, em relação à série de dados observacionais será apresentada:

Média Aritmética Simples

A Média é o valor $\bar{Z}$ obtido através da expressão:

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{n}$$

onde o numerador representa a soma de todos os valores da série e o denominador, o número n de termos da série.

O somatório estende-se aos $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n$; por este motivo, costuma-se anotar no somatório, que os Z a serem somados variam de Z_1 a Z_n (para $i=1, 2, 3, \dots, n$)

Mediana

O *valor mediano* ocupa o lugar central na graduação dos termos de uma série ordenada. Assim, ordenando-se os termos da série dada, a mediana será representada pelo elemento que se encontra antecedido e sucedido pelo mesmo número de termos.

Se n for um número ímpar, a mediana coincide com o termo central da série, ou seja, com o termo de ordem $\frac{n+1}{2}$. Se n for par, a mediana será representada por um valor intermediário aos termos de ordem $\frac{n}{2}$ e $\frac{n+2}{2}$.

A soma dos valores absolutos dos desvios em relação à mediana é um mínimo, isto é, é menor do que quando calculada em relação média. Outra propriedade é que o valor da mediana não fica alterado por variações, dos termos da série que a antecedem ou sucedem. Assim, como exemplo, a série 99, 100 e 101 e a série 1, 100 e 1.099 tem a mesma mediana 100 (enquanto que a média aritmética da primeira é igual a 100 e da segunda, 400).

Para alguns autores, “um inconveniente do valor mediano é que esse valor não fica alterado por variações, mesmo grande, dos termos que o precedem e que lhe seguem”.

Enquanto, outros autores sugerem este fato como vantagem: “A mediana é muito empregada para pesquisas onde não interessam os valores extremos, por terem pouca significação para o conjunto em geral”.

Em relação às médias, não há vantagens nem desvantagens: sob o ponto de vista matemático, as médias prevalecem de determinadas propriedades, algebricamente demonstráveis. O uso adequado da média depende dos objetivos que se tem em vista, do particular fenômeno estudado e de suas propriedades.

Desvio Padrão e Variância

O desvio padrão é uma medida do grau de dispersão dos valores em relação ao valor médio (a média). Por definição, é a média quadrática dos desvios, ou seja, é igual à raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos desvios. O desvio padrão considera que seus argumentos são uma amostra da população.

O desvio padrão é calculado usando o método "não-polarizado" ou "n-1". É comumente designado pela letra grega σ , onde:

$$\sigma = \sqrt{\frac{n \sum Z^2 - (\sum Z)^2}{n(n-1)}}$$

→ o quadrado de σ , constitui a variância (σ^2) de Z:

$$\sigma^2 = \frac{\sum (Z_i - \bar{Z})^2}{n}, \text{ ou no caso das distribuições, } \sigma^2 = \frac{\sum (Z_i - \bar{Z})^2 f}{\sum f}$$

onde a variância (σ^2) é satisfatória como uma medida de dispersão, sendo definida como a média dos quadrados dos desvios, dos valores da variável, em relação à sua média.

Coefficiente de Variação (Cv%)

O coeficiente de variação calculado neste trabalho corresponde ao percentual da dispersão ao redor da média de cada mês em relação ao valor médio de todos os meses do conjunto de dados, sendo Cv é dado pela expressão:

$$CV = 100 \frac{\sqrt{\sigma_z^2}}{\bar{Z}}$$

Valor Mínimo e Valor Máximo

Estes valores permitem visualizar a menor ocorrência e a maior ocorrência, e podem ser um primeiro indicativo de erros de amostragem, digitação, etc. A obtenção desses valores se faz a partir da ordenação dos valores dos dados observacionais.

APÊNDICE

B – COEFICIENTE DO MODELO PARA ESTIMATIVA DAS TEMPERATURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS MÉDIAS MENSAIS DO ESTADO DE ALAGOAS

Tabela 4 - Coeficientes utilizados para os cálculos das temperaturas médias mensais máximas (T_x) nas regiões do litoral e zona da mata do Estado de Alagoas

MÊS	a	b	c	d
Janeiro	-19,52575	-1,03257	1,76032	-0,00764
Fevereiro	-2,80372	-0,59899	1,16776	-0,00897
Março	-5,35752	-1,31194	1,43157	-0,00887
Abril	-4,33362	-0,43692	1,07807	-0,00983
Maio	-4,77359	-0,15511	1,03826	-0,00931
Junho	-4,47011	-0,47849	1,07945	-0,00923
Julho	-6,62617	-0,3729	1,08629	-0,00911
Agosto	-10,32887	-0,46842	1,22111	-0,00802
Setembro	-8,5777	-0,56274	1,22716	-0,00791
Outubro	-7,96019	-1,11335	1,40973	-0,00771
Novembro	-0,46241	-1,65053	1,37107	-0,00635
Dezembro	2,20584	-0,9698	1,12644	-0,00569

Tabela 5 - Coeficientes utilizados para os cálculos das temperaturas mínimas (T_n) nas regiões do litoral e zona da mata do Estado de Alagoas

MÊS	a	b	c	d
Janeiro	44,77643	0,65284	-0,80358	-0,00626
Fevereiro	20,95206	0,79453	-0,19143	-0,00542
Março	63,58798	0,21169	-1,19628	-0,00647
Abril	70,31984	0,21567	-1,50319	-0,00616
Maio	66,09338	0,61791	-1,40177	-0,00617
Junho	60,37136	0,97664	-1,36196	-0,00582
Julho	57,87442	1,25645	-1,38918	-0,00547
Agosto	46,47491	1,03472	-1,02734	-0,00432
Setembro	44,94852	1,1218	-0,99364	-0,00473
Outubro	28,32736	0,77809	-0,42938	-0,00451
Novembro	23,08183	0,80314	-0,26851	-0,00483
Dezembro	30,35706	0,84724	-0,47235	-0,00452

Tabela 6 - Coeficientes utilizados para os cálculos das temperaturas máximas (T_x) nas regiões do sertão e agrestes do Estado de Alagoas

MÊS	a	b	c	d
Janeiro	97,0436	-1,8705	-1,1121	-0,0124
Fevereiro	58,7758	0,15883	-0,6255	-0,0095
Março	47,708	0,01085	-0,2904	-0,0104
Abril	47,1628	-1,9149	0,17786	-0,0134
Maio	36,5399	-2,6016	0,55299	-0,0114
Junho	42,3692	-4,3669	0,81747	-0,0143
Julho	25,5722	-5,1412	1,45567	-0,0156
Agosto	52,1393	-6,9385	1,23341	-0,0177
Setembro	48,6303	-5,1834	0,93222	-0,0149
Outubro	51,8181	-3,7573	0,54189	-0,0133
Novembro	58,3511	-3,4126	0,30525	-0,0133
Dezembro	63,4028	-1,7598	-0,2354	-0,0121

Tabela 7 - Coeficientes utilizados para os cálculos das temperaturas mínimas (T_n) para as Regiões do Sertão e Agrestes do Estado de Alagoas.

MÊS	a	b	c	d
Janeiro	20,977	-1,004	0,3459	-0,0089
Fevereiro	19,2604	-0,7387	0,3203	-0,008
Março	16,4861	0,11378	0,18388	-0,0075
Abril	16,4899	-0,495	0,33067	-0,0081
Maio	13,1547	-0,3636	0,34314	-0,0067
Junho	11,9677	-0,3777	0,34203	-0,0057
Julho	7,76585	-0,1286	0,36391	-0,005
Agosto	1,35635	0,02472	0,48667	-0,0044
Setembro	-2,0536	-0,5195	0,7555	-0,0075
Outubro	4,72475	-0,8662	0,6932	-0,0073
Novembro	-5,3367	0,20368	0,71262	-0,0068
Dezembro	19,639	-0,748	0,32003	-0,0088

APÊNDICE

C – ESPACIALIZAÇÃO DAS TEMPERATURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS MÉDIAS MENSAIS DO ESTADO DE ALAGOAS

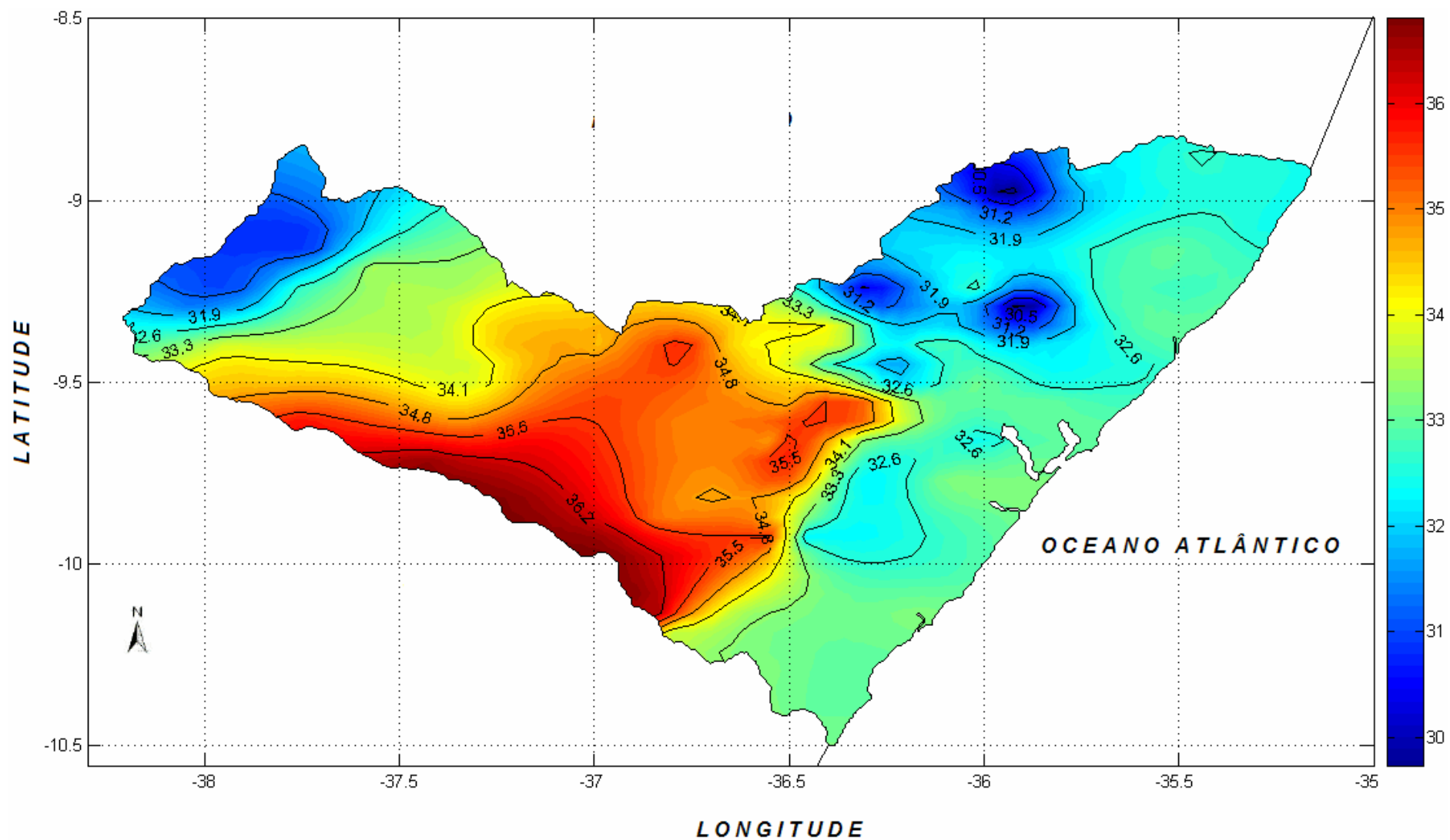


Figura 29 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima média mensal (Tx) de FEVEREIRO em °C para o estado de Alagoas.

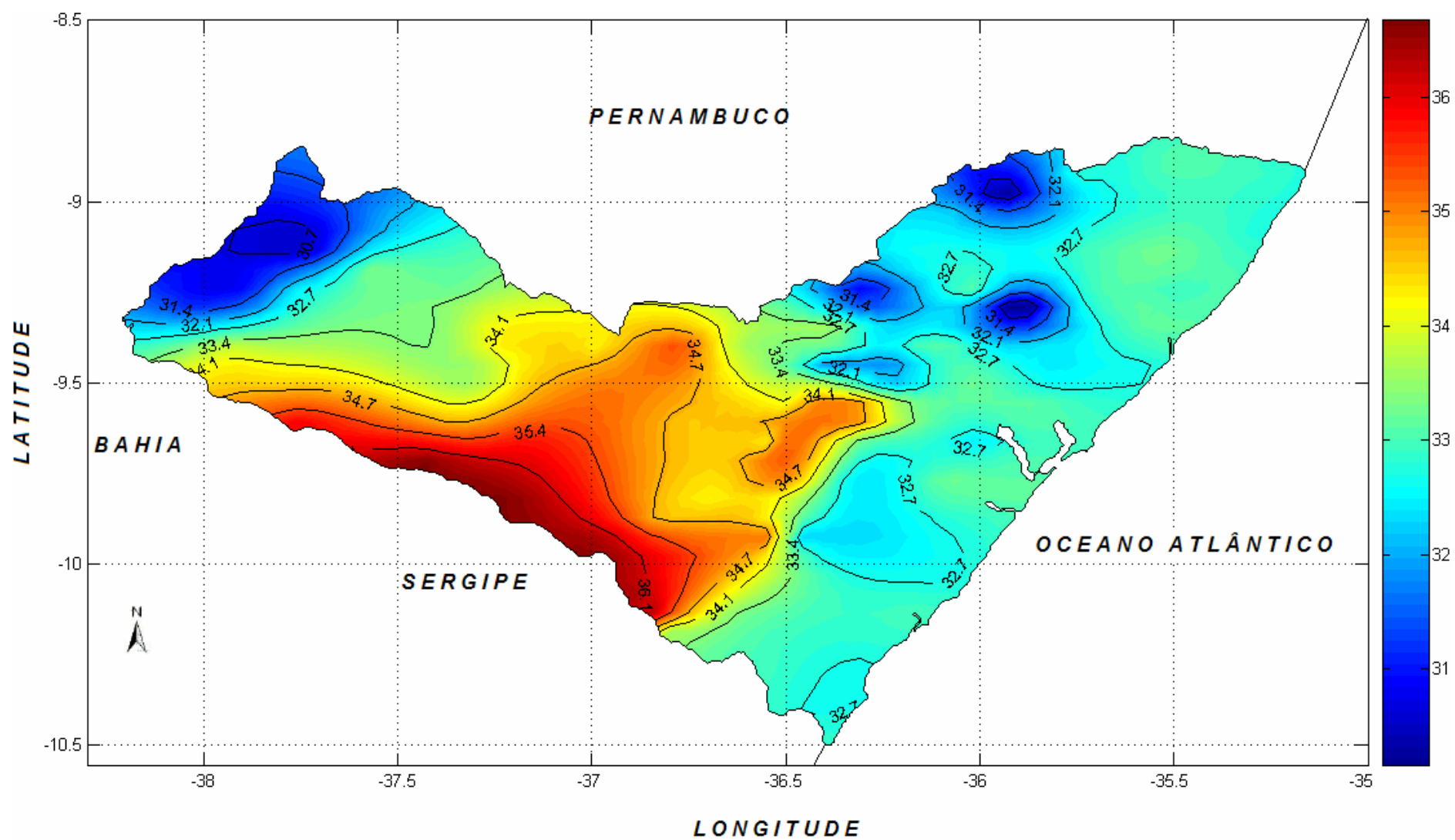


Figura 30 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima média mensal (Tx) de MARÇO em °C para o estado de Alagoas.

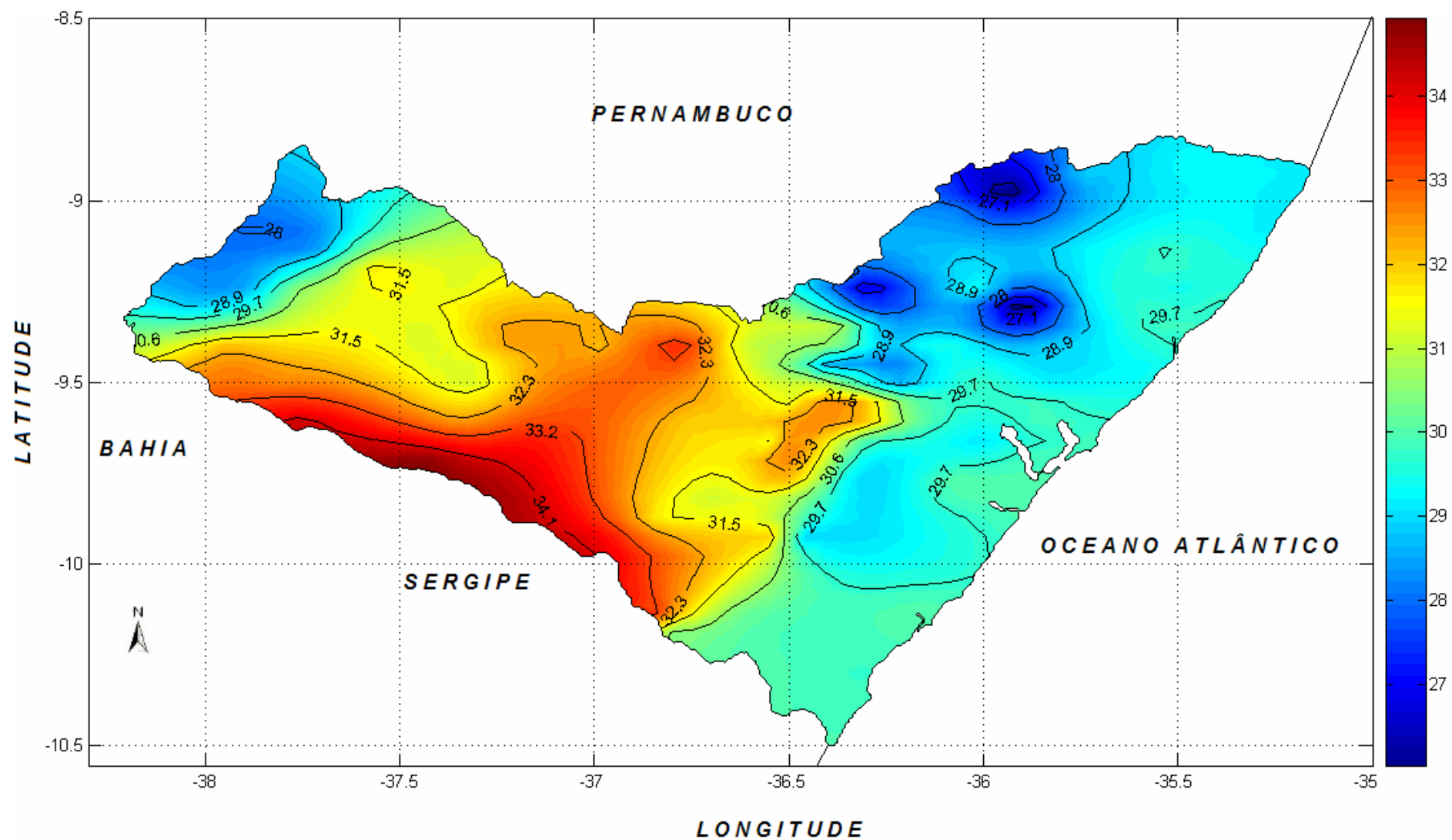


Figura 31 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima média mensal (Tx) de ABRIL em °C para o estado de Alagoas.

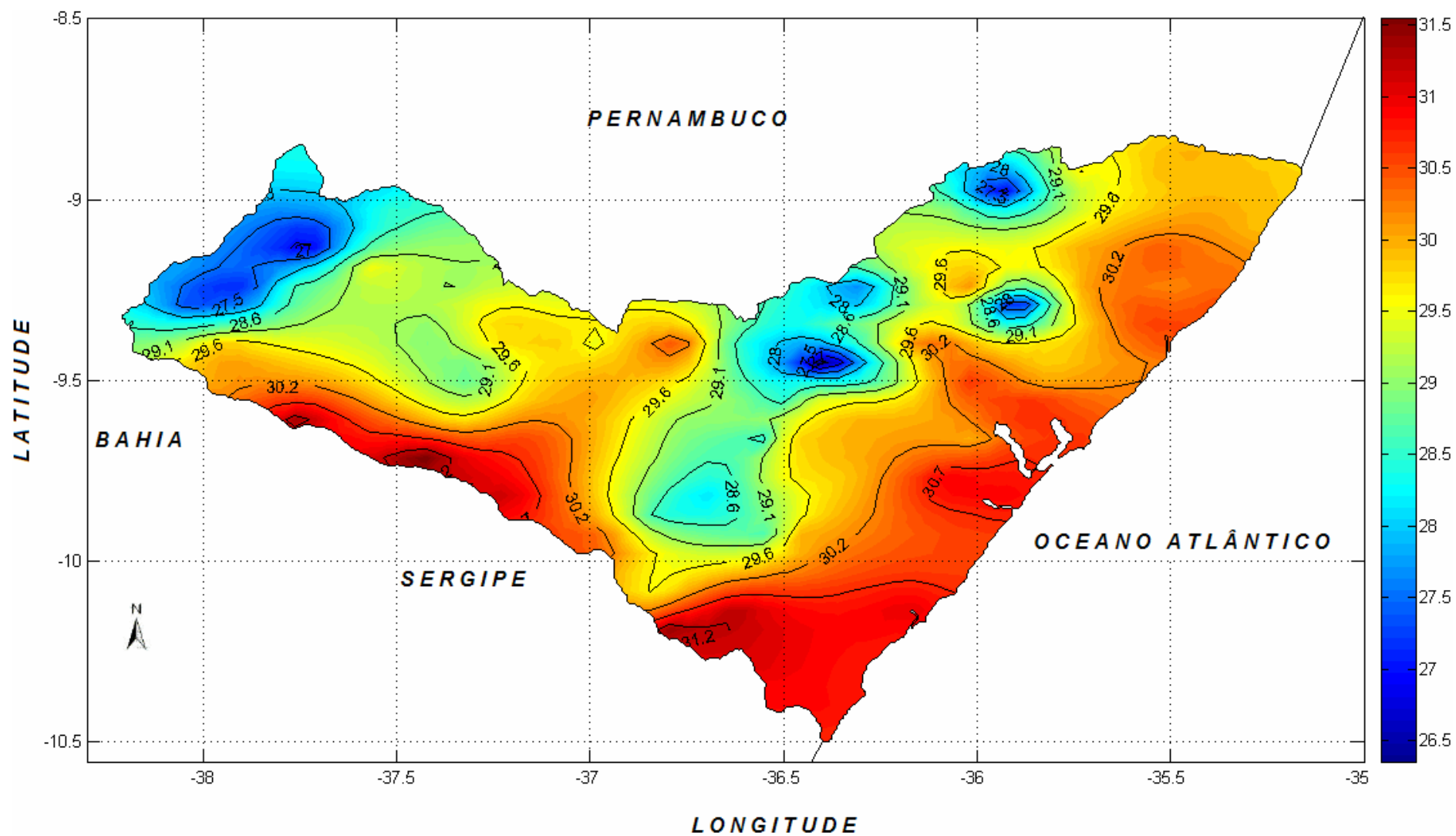


Figura 32 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima média mensal (Tx) de MAIO em °C para o estado de Alagoas.

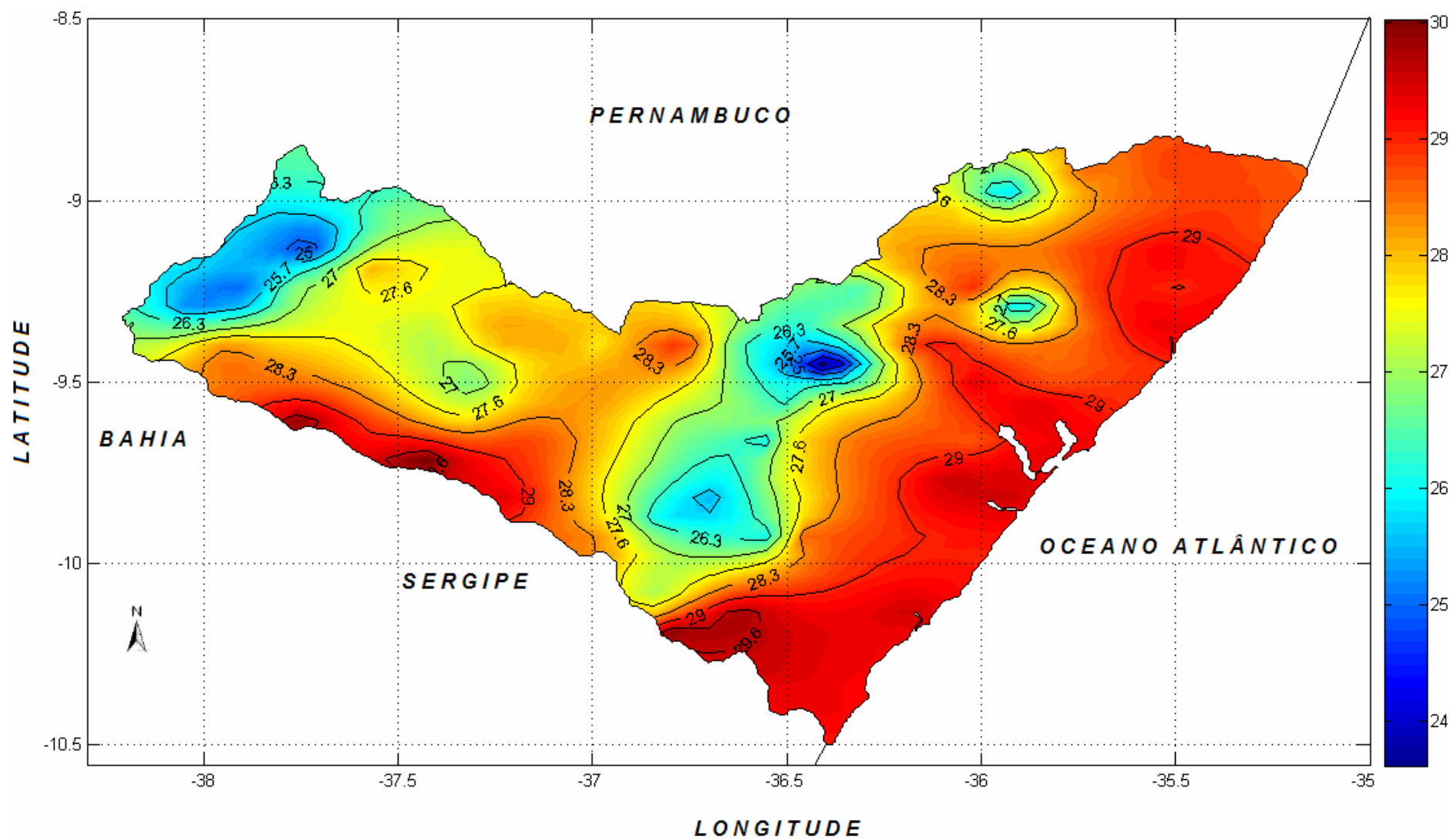


Figura 33 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima média mensal (Tx) de JUNHO em °C para o estado de Alagoas.

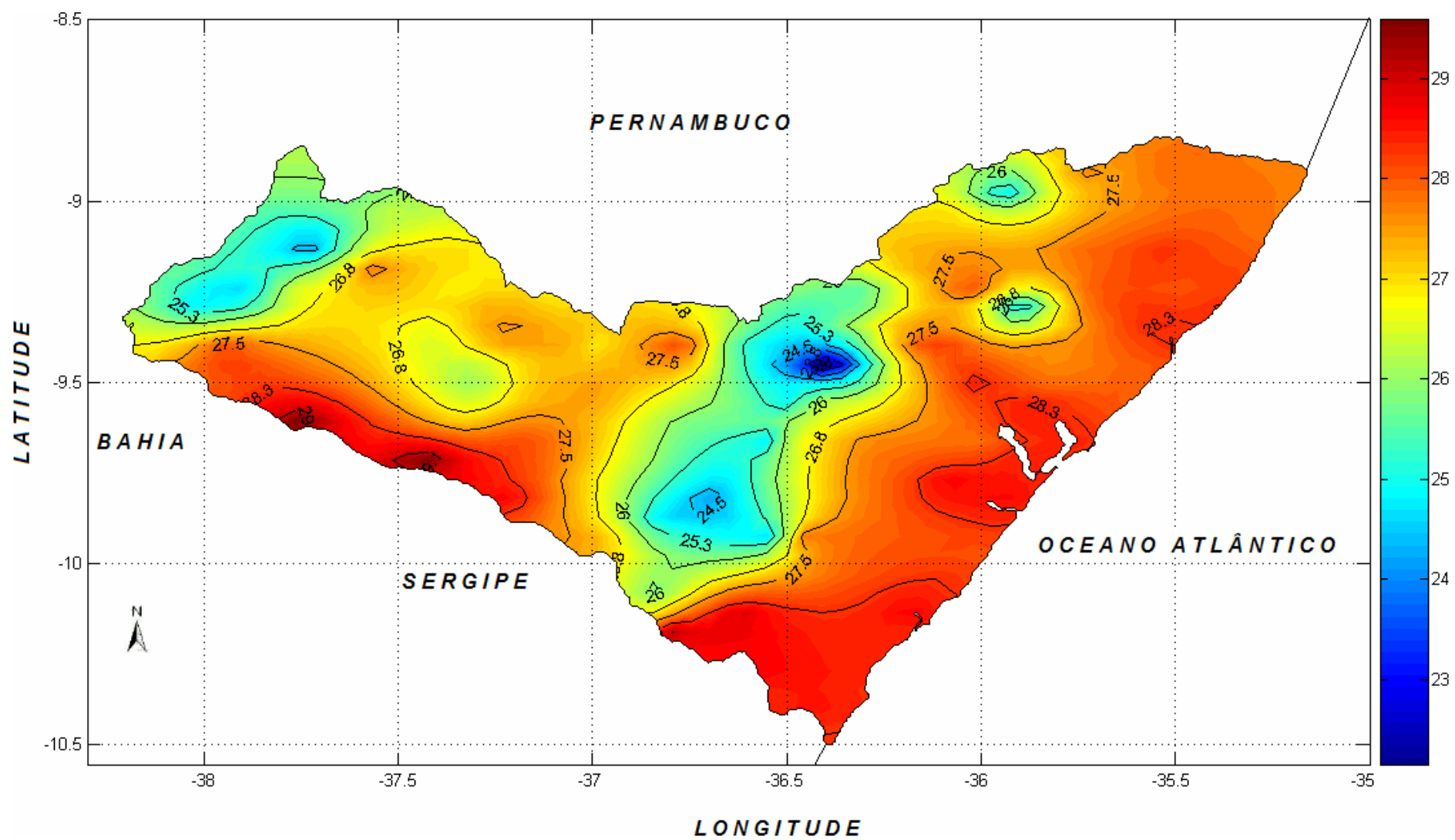


Figura 34 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima média mensal (Tx) de JULHO em °C para o estado de Alagoas.

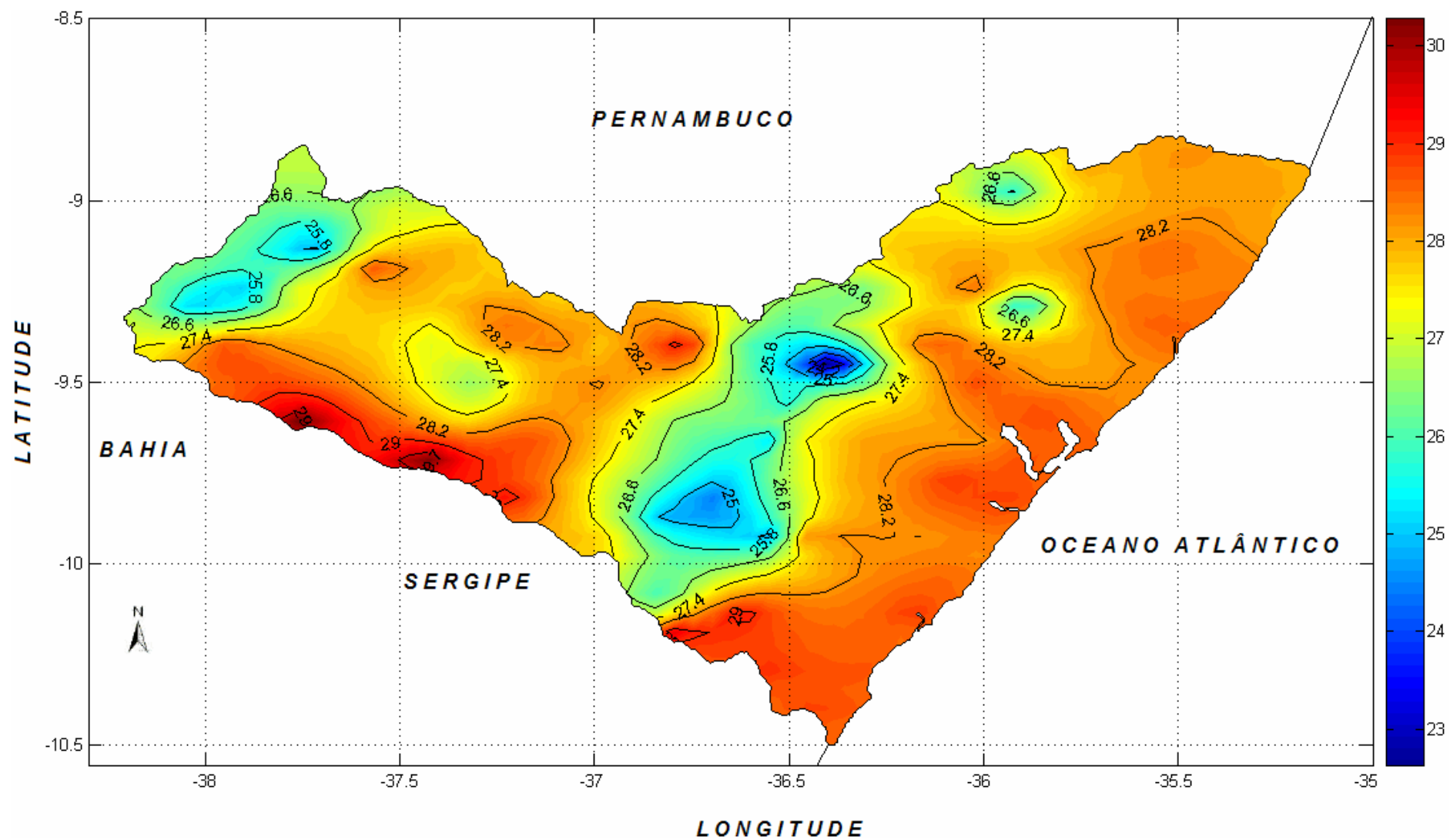


Figura 35 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima média mensal (Tx) de AGOSTO em °C para o estado de Alagoas.

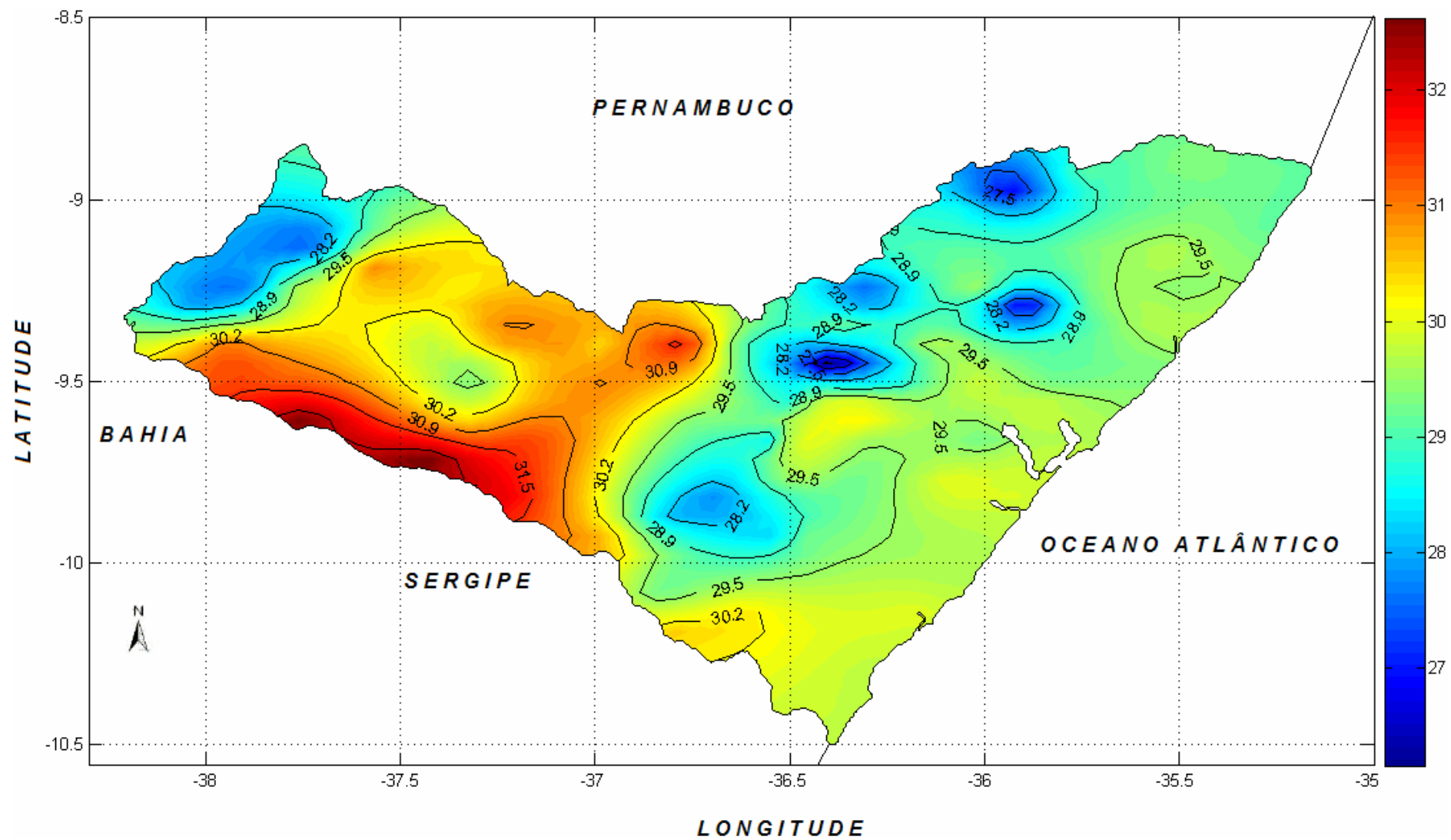


Figura 36 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima média mensal (T_x) de SETEMBRO em $^{\circ}\text{C}$ para o estado de Alagoas.

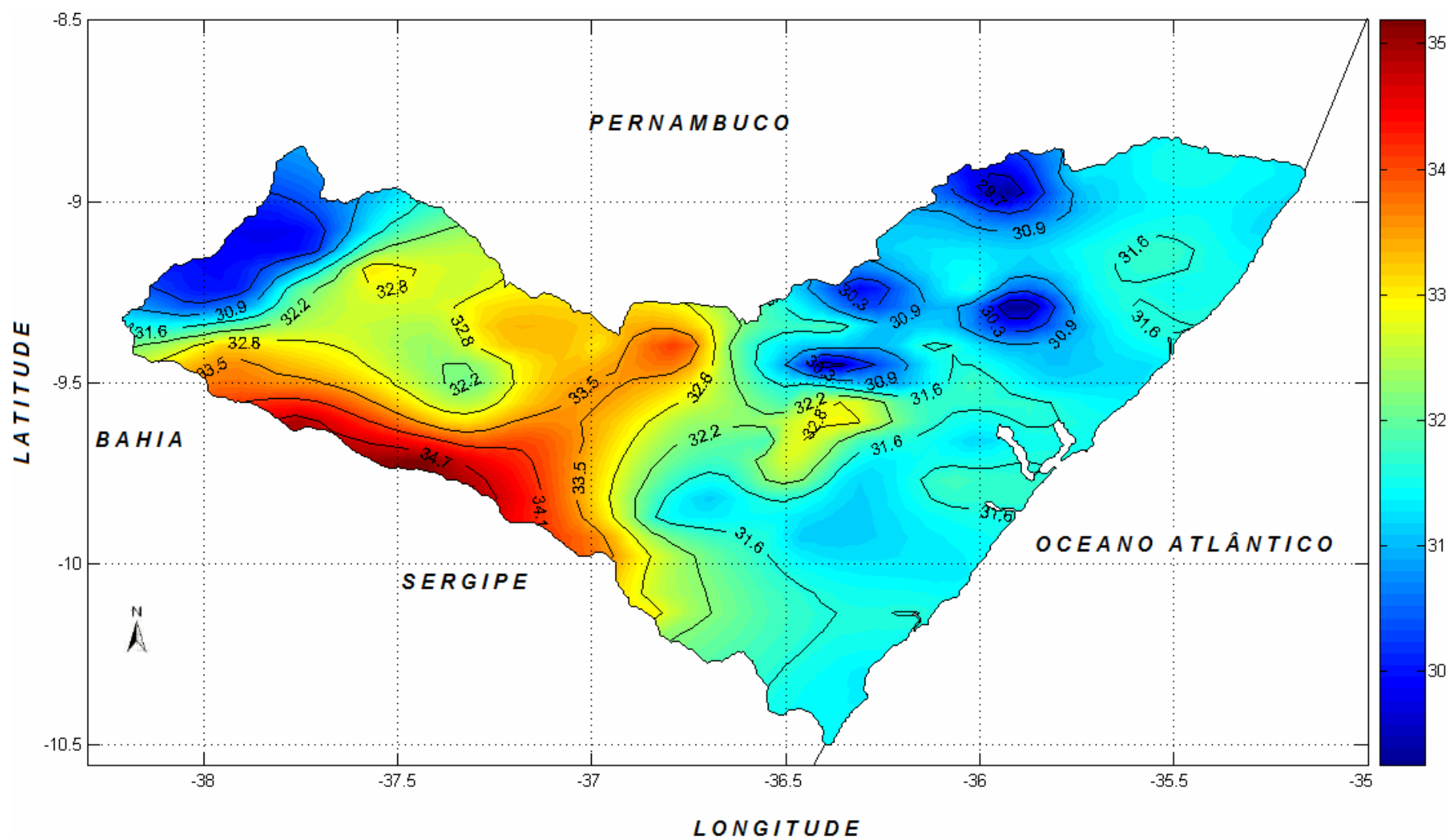


Figura 37 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima média mensal (Tx) de OUTUBRO em °C para o estado de Alagoas.

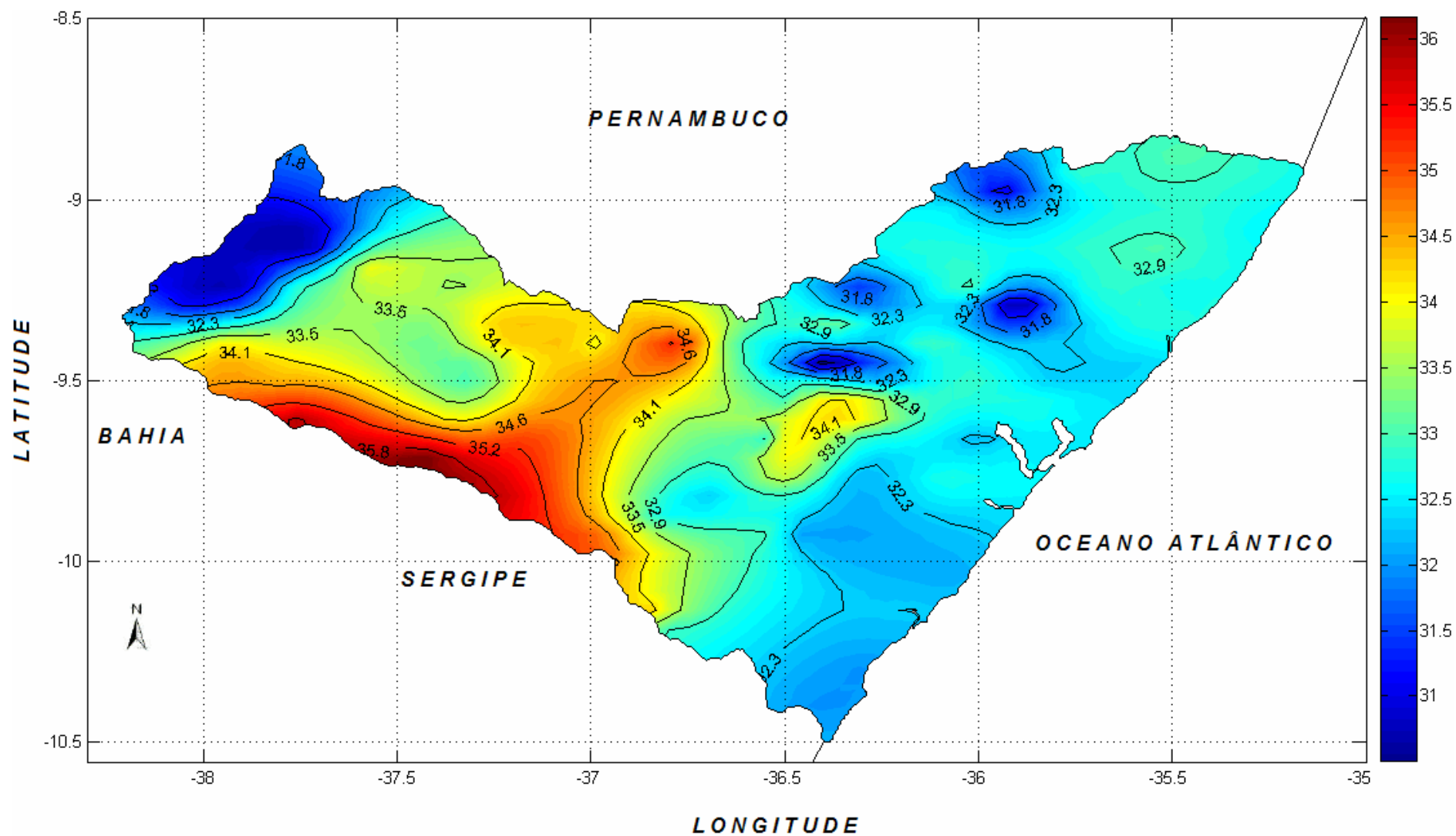


Figura 38 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima média mensal (Tx) de NOVEMBRO em °C para o estado de Alagoas.

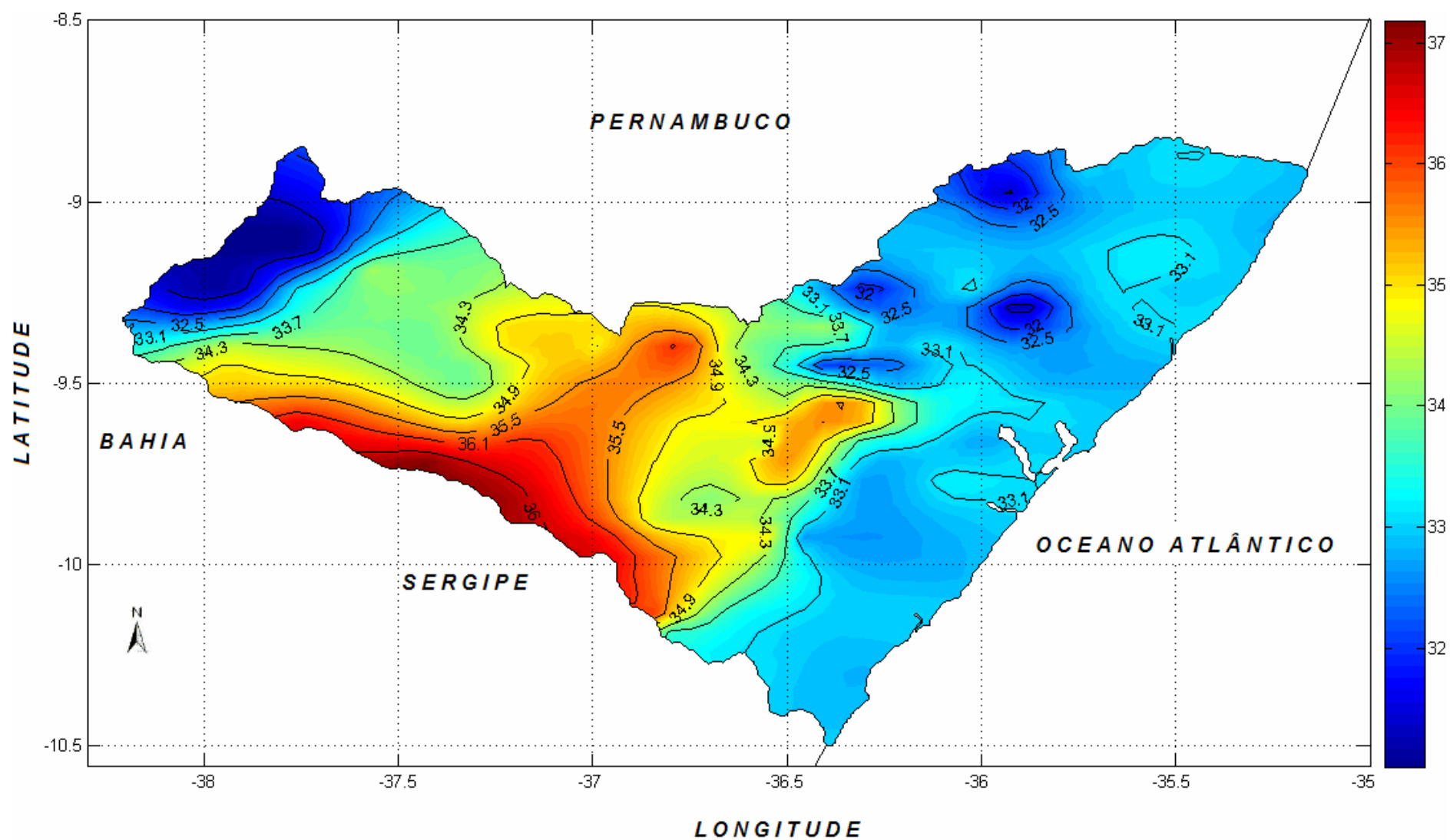


Figura 39 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima média mensal (Tx) de DEZEMBRO em °C para o estado de Alagoas.

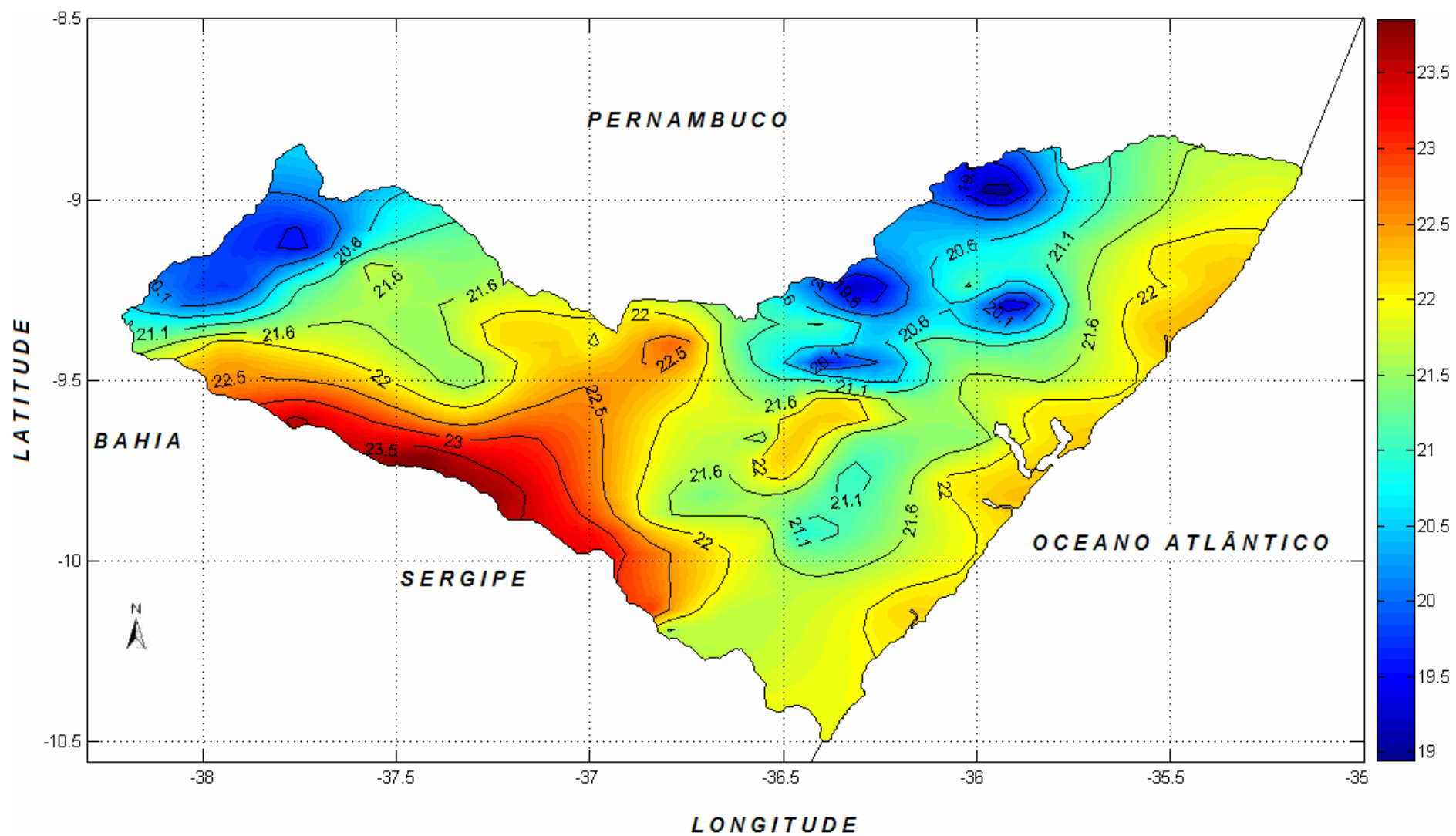


Figura 40 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima média mensal (T_n) de JANEIRO em °C para o estado de Alagoas.

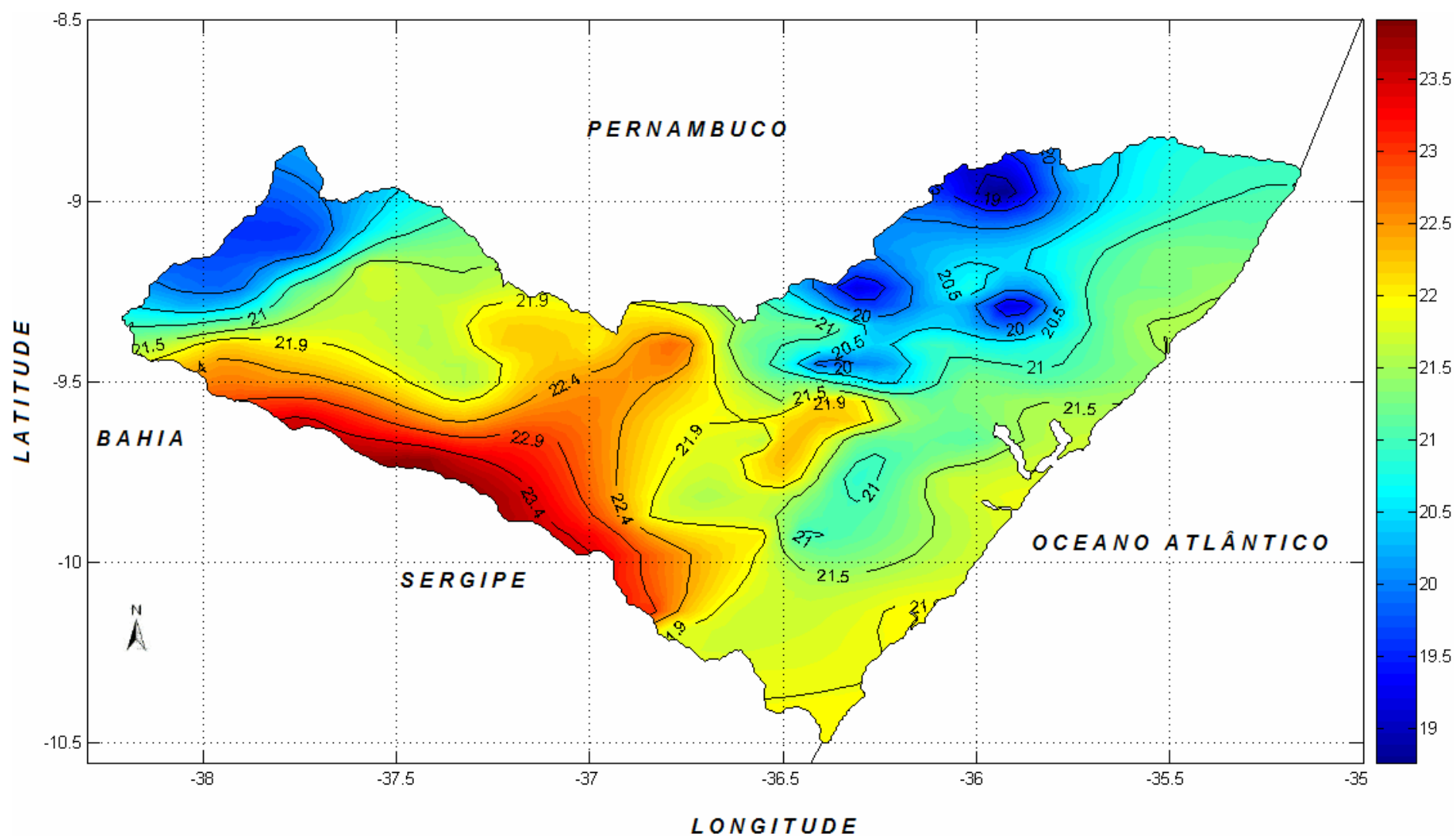


Figura 41 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima média mensal (Tn) de FEVEREIRO em °C para o estado de Alagoas.

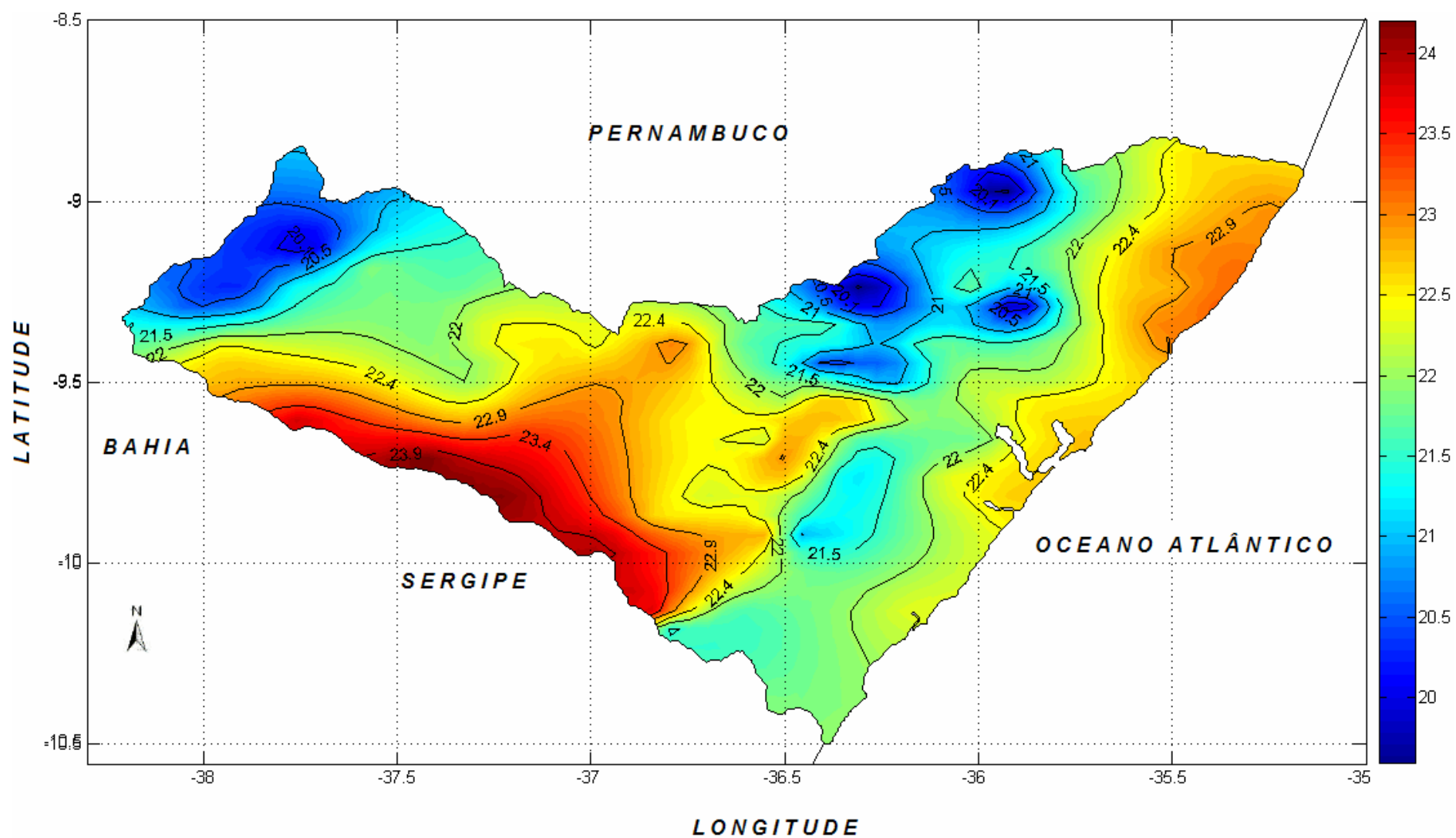


Figura 42 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima média mensal (Tn) de MARÇO em °C para o estado de Alagoas.

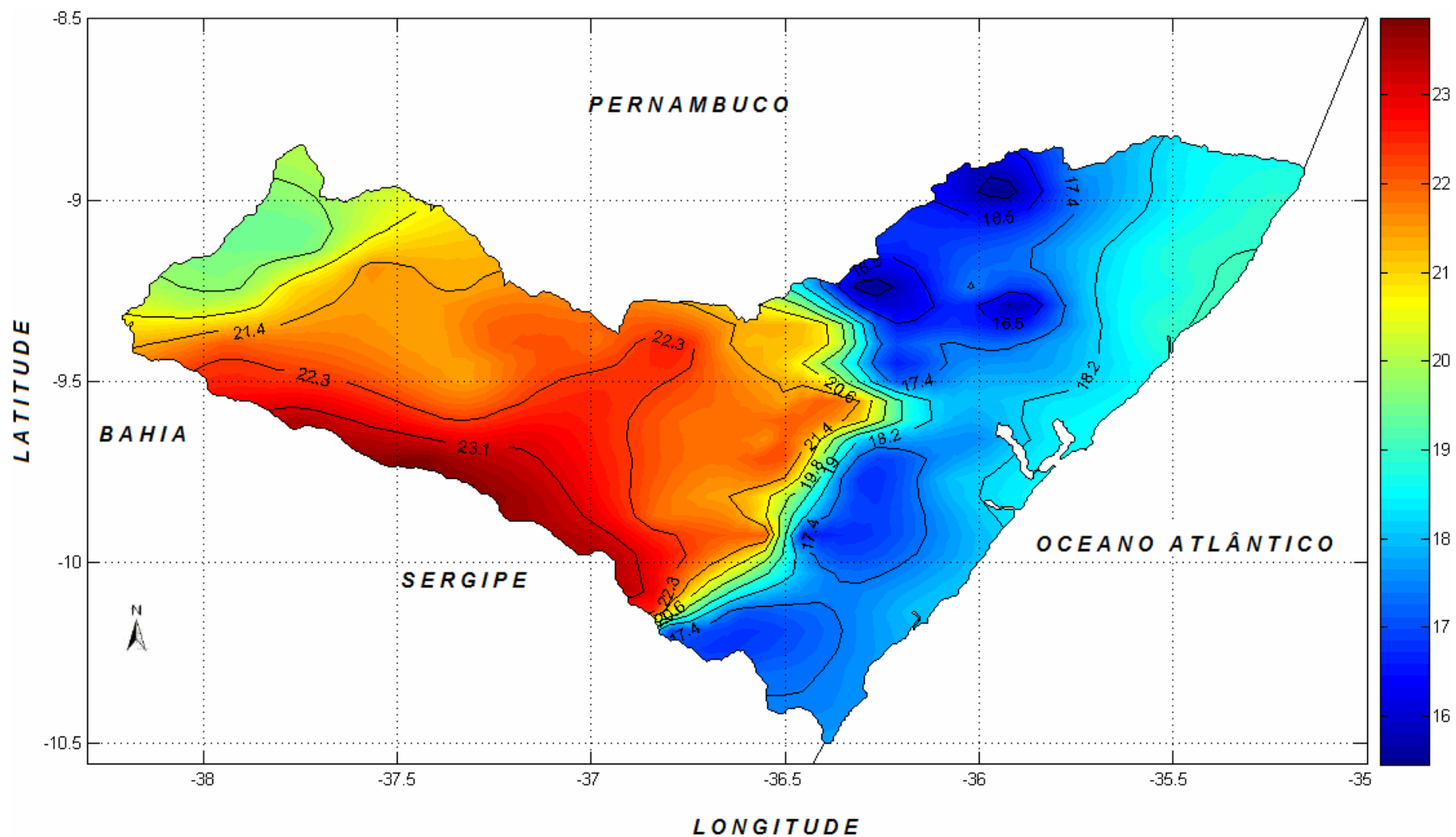


Figura 43 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima média mensal (T_n) de ABRIL em °C para o estado de Alagoas.

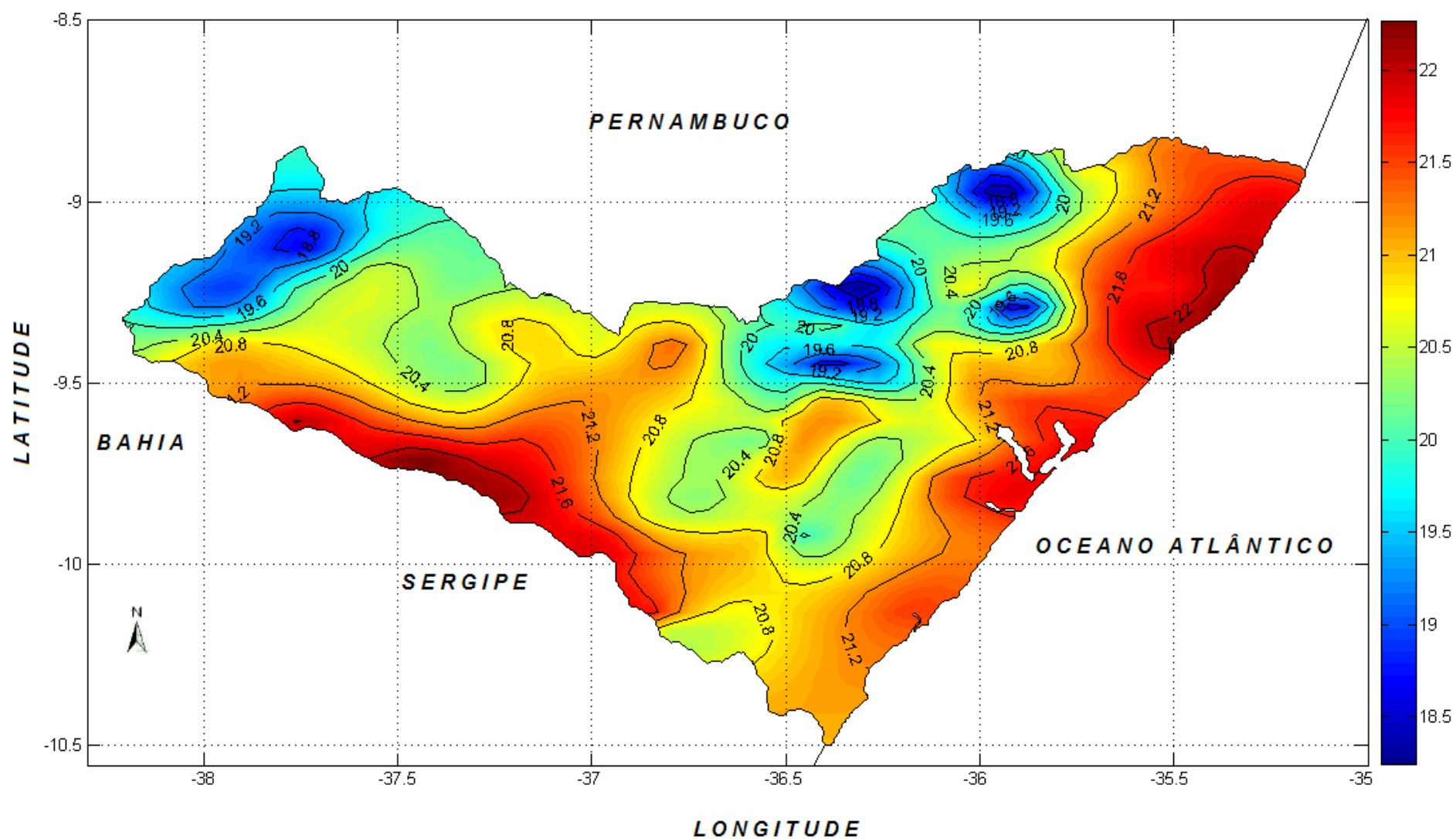


Figura 44 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima média mensal (T_n) de MAIO em °C para o estado de Alagoas.

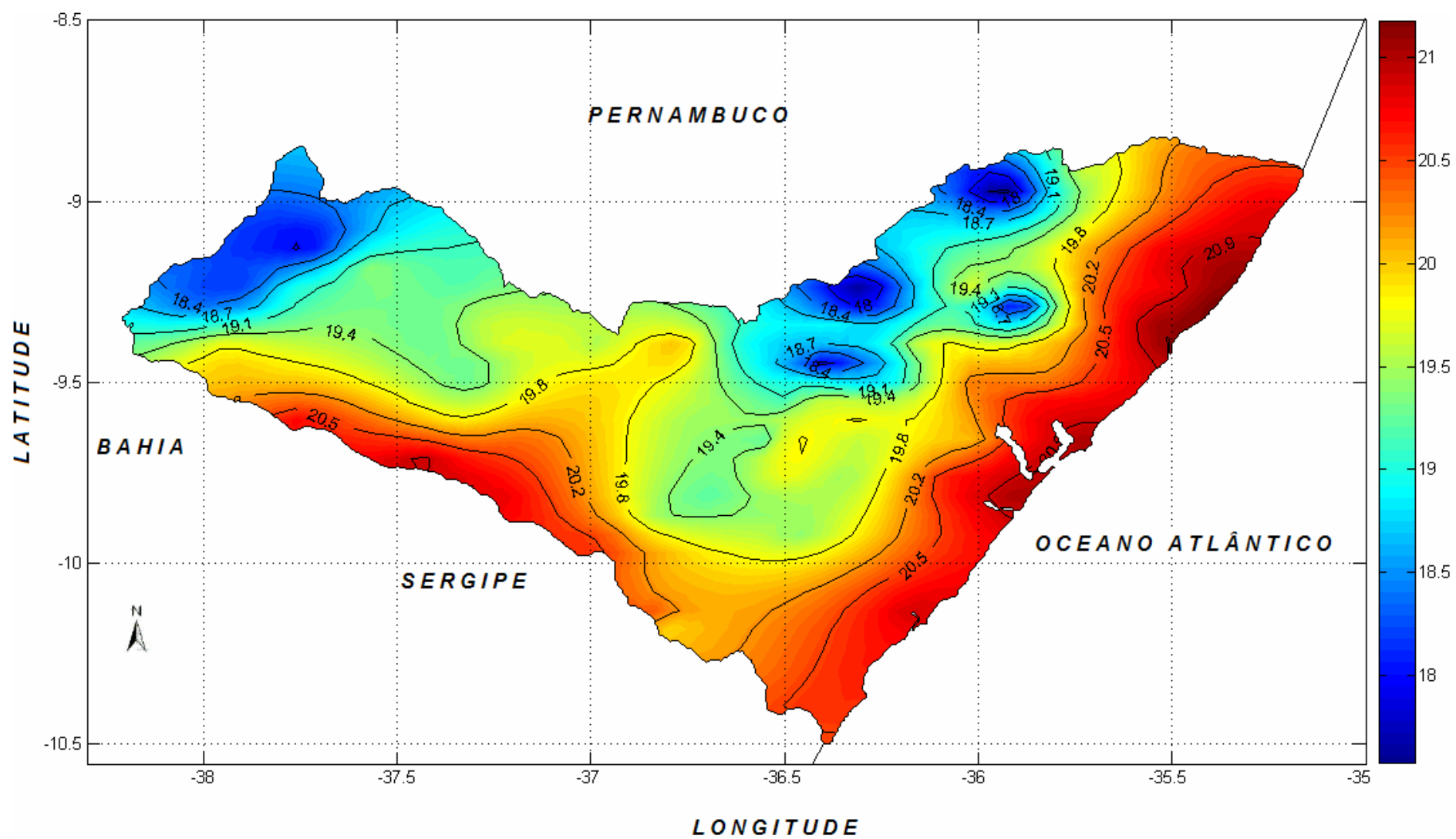


Figura 45 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima média mensal (Tn) de JUNHO em °C para o estado de Alagoas.

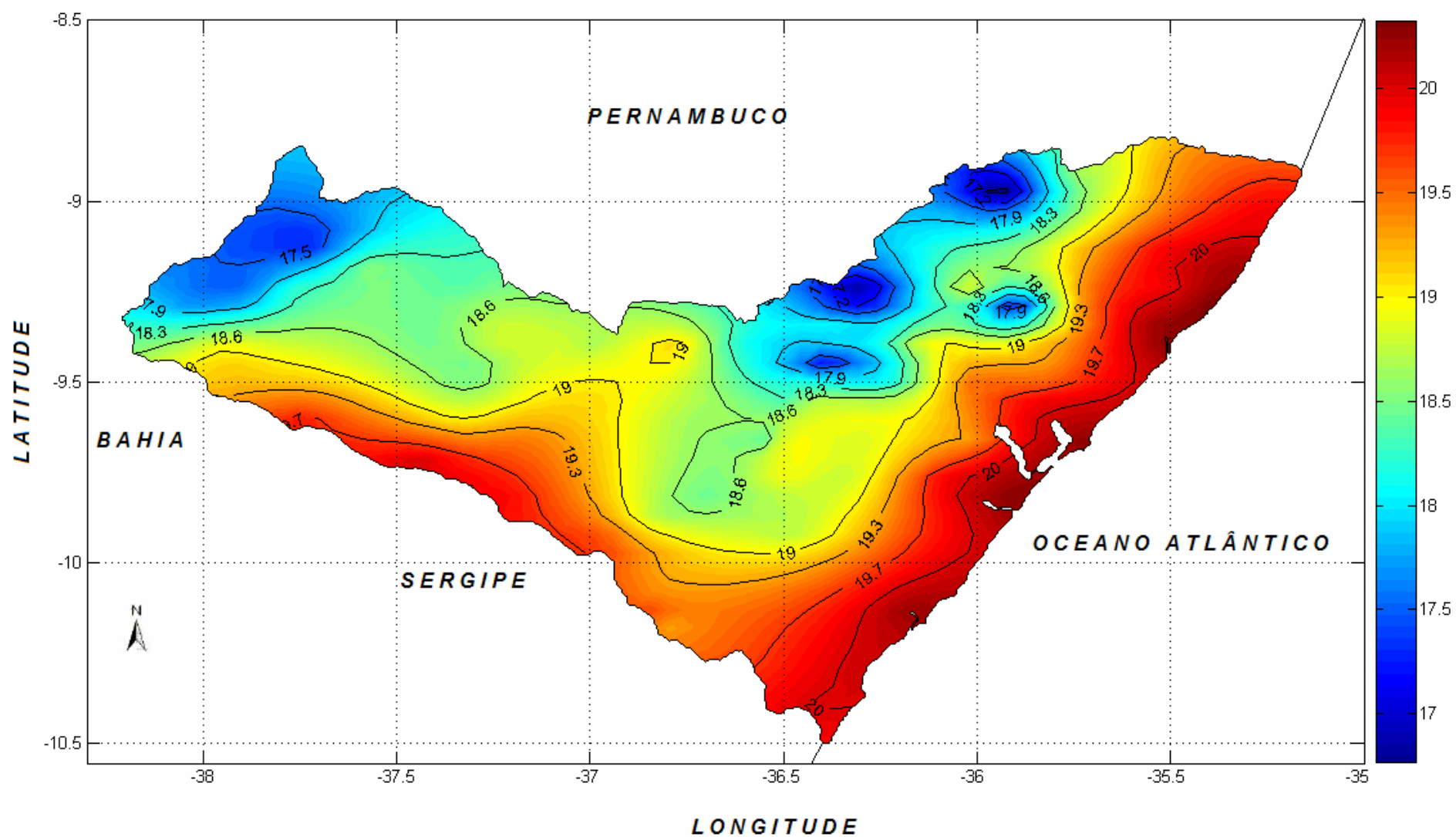


Figura 46 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima média mensal (T_n) de JULHO em $^{\circ}\text{C}$ para o estado de Alagoas.

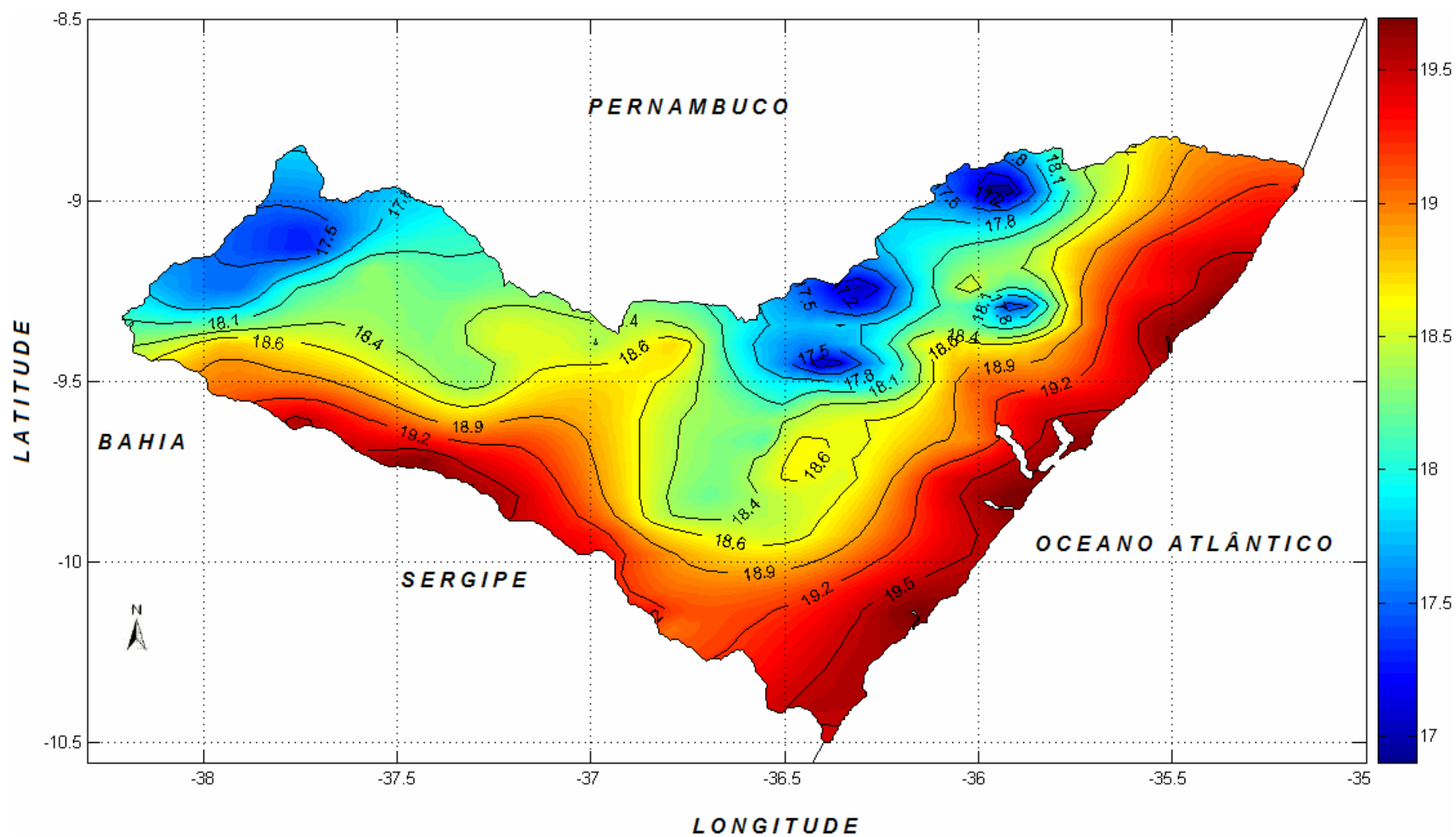


Figura 47 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima média mensal (T_n) de AGOSTO em °C para o estado de Alagoas.

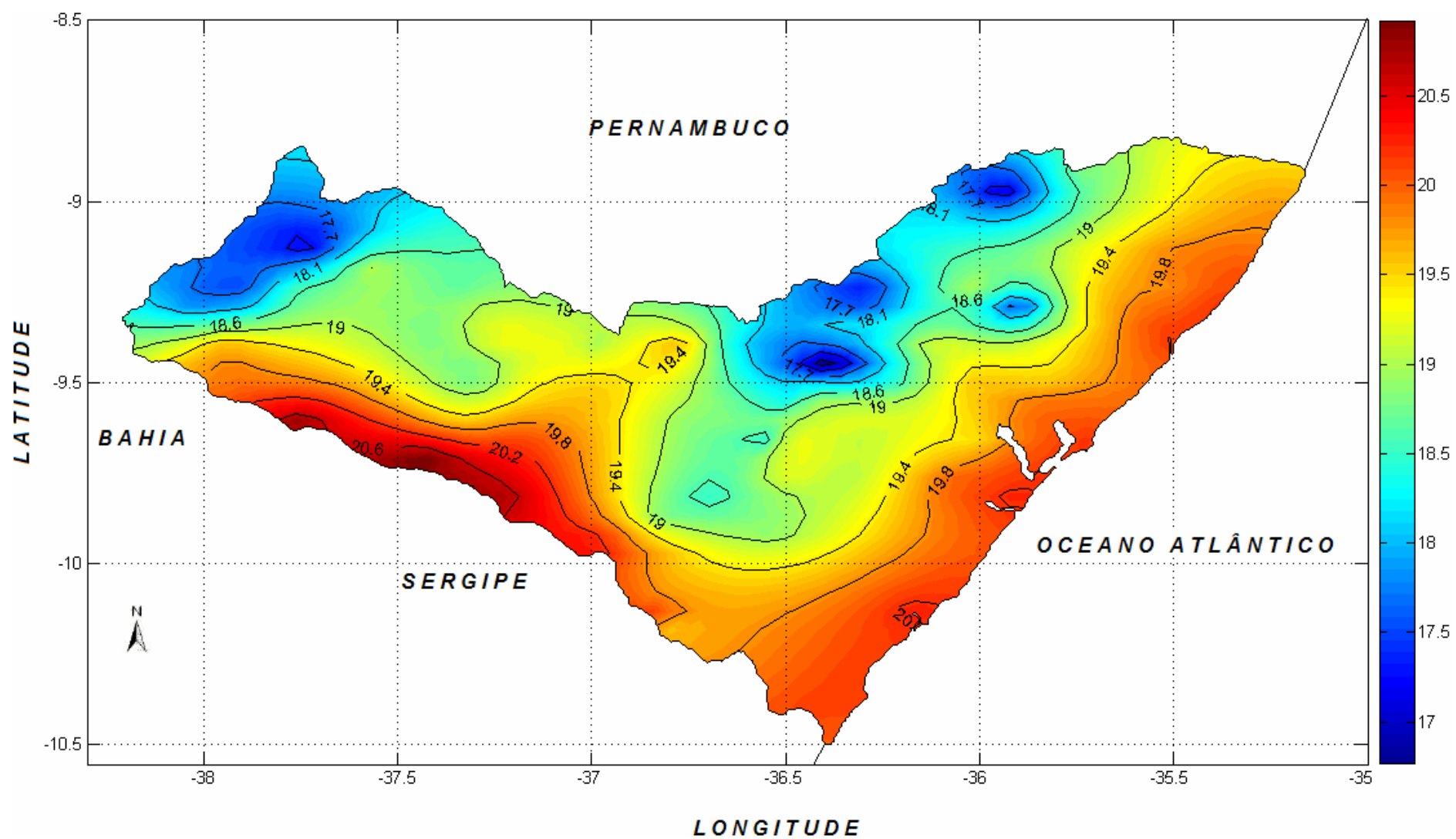


Figura 48 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima média mensal (T_n) de SETEMBRO em $^{\circ}\text{C}$ para o estado de Alagoas.

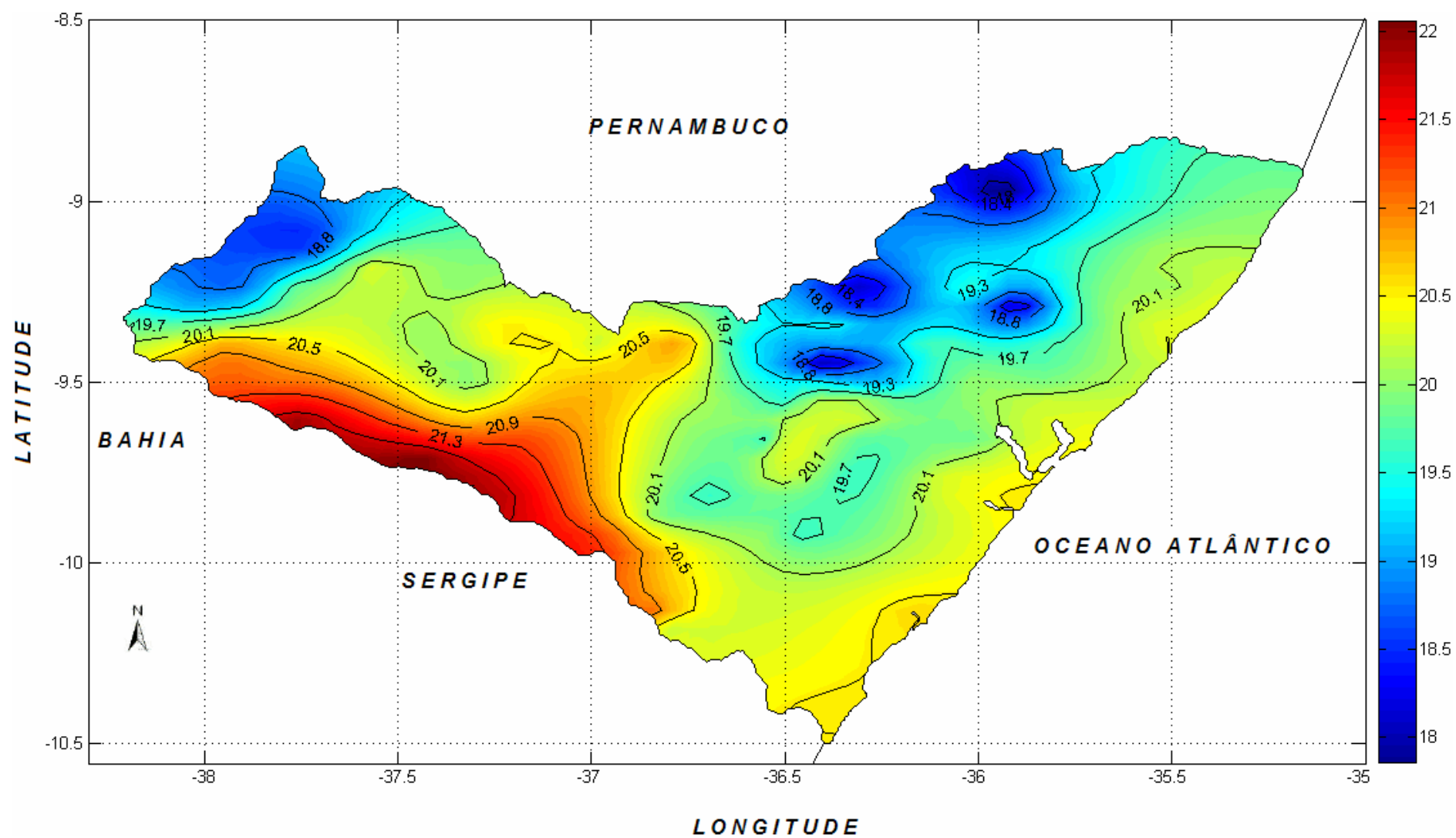


Figura 49 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima média mensal (T_n) de OUTUBRO em °C para o estado de Alagoas.

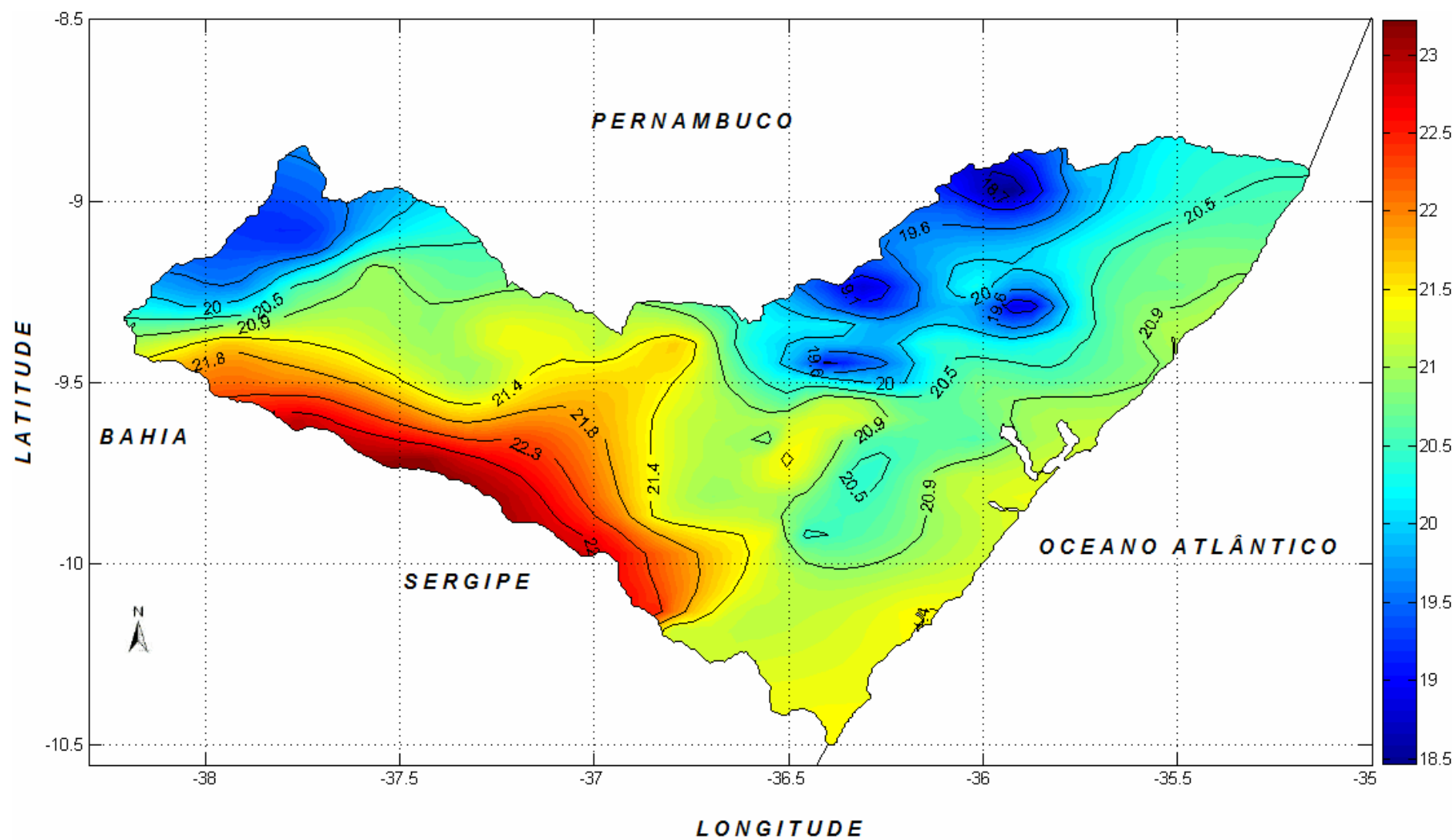


Figura 50 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima média mensal (T_n) de NOVEMBRO em °C para o estado de Alagoas.

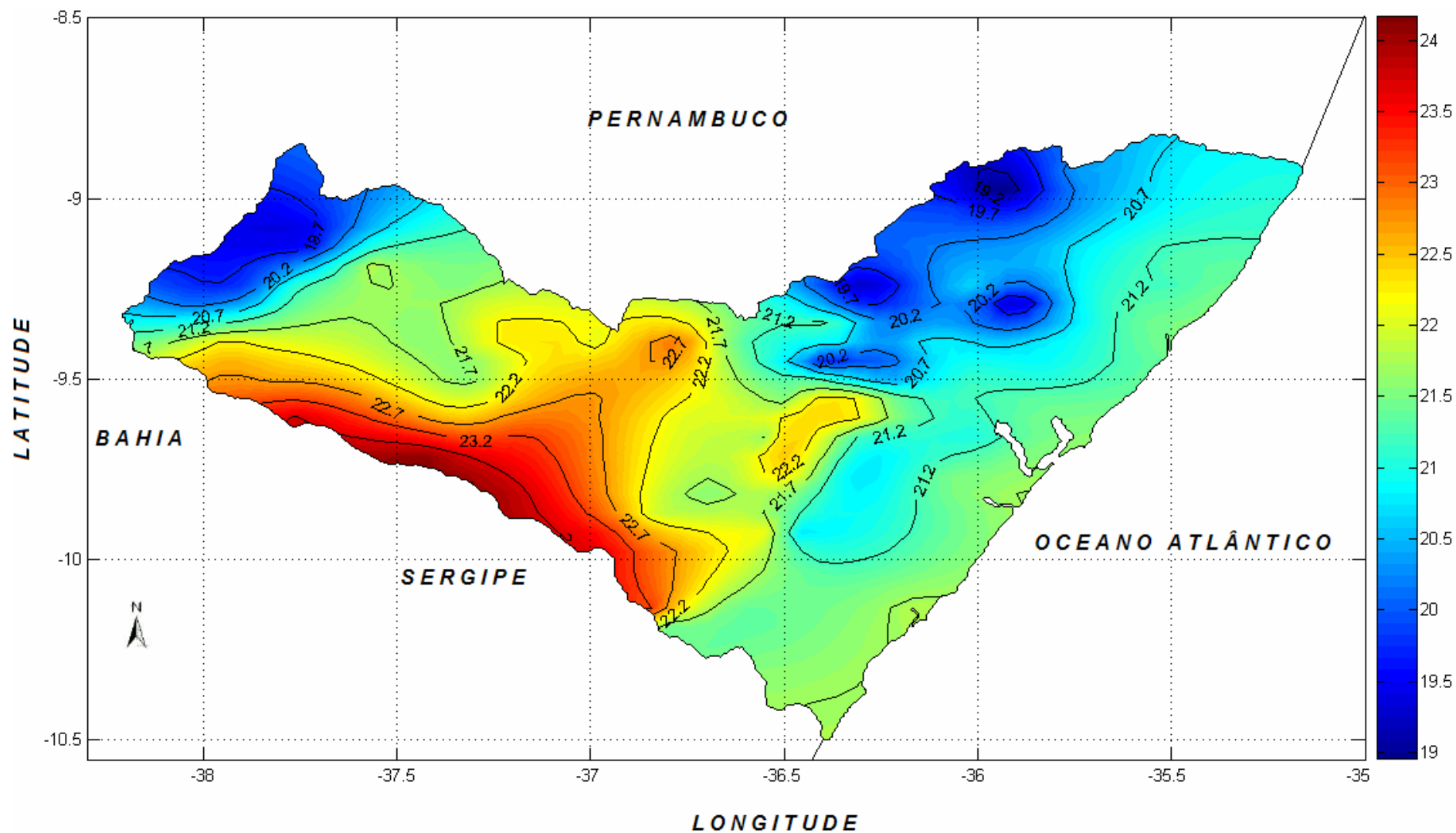


Figura 51 – Distribuição Espacial da Temperatura Máxima média mensal (Tn) de DEZEMBRO em °C para o estado de Alagoas.

