

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CASSIANO RICARDO UMLAUF

RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE PROVÁVEL PARA O ESTADO DO PARANÁ

CURITIBA

2018

CASSIANO RICARDO UMLAUF

RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE PROVÁVEL PARA O ESTADO DO PARANÁ

Trabalho apresentado como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Agrônomo no curso de graduação em Agronomia, Setor de Ciências Agrárias, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Professor Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza

Co-Orientador: Professor Dr. Alexandre Cândido Xavier

CURITIBA

2018

TERMO DE APROVAÇÃO

CASSIANO RICARDO UMLAUF

RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE PROVÁVEL PARA O ESTADO DO PARANÁ

Trabalho apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Agrônomo no curso de graduação em Agronomia, pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza

Orientador – Departamento de Solos e Engenharia Agrícola / SCA / UFPR.

Mestranda Stefanie Lais Kreutz Rosa

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo / DSEA / SCA / UFPR

Mestrando Felipe Augusto Piacentini Grabarski

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo / DSEA / SCA / UFPR

Curitiba, 28 de junho de 2018.

DEDICATÓRIA

"Não sou obrigado a vencer, mas tenho o dever de ser verdadeiro. Não sou obrigado a ter sucesso, mas tenho o dever de corresponder à luz que tenho."

(Abraham Lincoln)

Dedico este Trabalho de Conclusão de Curso à minha avó Iracema, aos meus pais Ricardo e Sandra, à minha irmã Jessica, à minha namorada Carina, ao meu orientador e à todos que colaboraram para que este trabalho fosse possível.

AGRADECIMENTOS

- À Coordenação do Curso de Engenharia Agrônômica da Universidade Federal do Paraná, pelo suporte ao longo de toda minha graduação, e pelo trabalho constante em oferecer um curso de alta qualidade;
- Ao meu orientador Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza, pelo incentivo, amizade e estar sempre disponível para conselhos e dúvidas;
- Agradeço ao Prof. Dr. Alexandre Cândido Xavier por ter disponibilizado os dados climáticos utilizados na realização do presente trabalho;
- Aos meus pais, Ricardo Augusto Umlauf e Sandra Mara Salazar Umlauf, pelo apoio, dedicação e por tornar este trabalho possível, bem como toda a minha formação acadêmica;
- À minha irmã Jessica Mara Umlauf pela amizade e confiança;
- À minha avó Iracema Salazar, que sempre me deu todo o apoio necessário;
- À minha namorada Carina, que sempre me deu auxílio para os momentos difíceis;
- Agradeço aos colegas do Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas (LAMOSA), pela ajuda e apoio no desenvolvimento deste trabalho;
- À todos os professores da Universidade Federal do Paraná, que fazem desta uma das melhores Universidades do país;
- À todos os amigos e colegas, que de alguma forma estavam próximos durante minha formação acadêmica.

RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE PROVÁVEL PARA O ESTADO DO PARANÁ

RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho ajustar os dados de radiação solar incidente (R_s) de todo o Estado do Paraná à cinco funções densidade de probabilidade (f_{dp}), escolher a f_{dp} de melhor ajuste e estimar os valores prováveis da R_s à 50%, 75% e 95% de probabilidade. Nas análises foram utilizados dados interpolados de um estudo anterior, formando malha 0,25 por 0,25 graus, contendo dados de 279 pontos especializados no Estado do Paraná. A série de dados diários de R_s considerando o período entre 1980 e 2013 foi analisada em planilha eletrônica desenvolvida para essa finalidade: agrupando os dados em períodos decendiais; realizando distribuições de frequência da R_s para períodos decendiais; realizando testes aderência para cinco f_{dp} 's (Normal, Uniforme, Exponencial, Triangular e Gama), escolhendo a f_{dp} de melhor ajuste com o teste de Kolmogorov-Smirnov; e, estimando valores prováveis da R_s à 50%, 75% e 95% de probabilidade. Com os valores prováveis de R_s calculados foram confeccionados mapas com o programa de geoprocessamento *Surfer* 8.0, utilizando o método de interpolação *krigagem*, para períodos decendiais. Nas análises realizadas, verificou-se a variação da radiação solar incidente nas regiões e tipos climáticos presentes no Paraná. Os resultados são importantes para estabelecer valores de referência para futuras aplicações nas diversas áreas (agrícola, ambiental, ecológica, meteorológica e hidrológica), em que a R_s tem relevância.

Palavras-chave: Radiação solar global, f_{dp} , probabilidade;

INCIDENT SOLAR RADIATION PROBABLE FOR THE STATE OF PARANÁ

ABSTRACT

The objective of this study was to adjust data from the incident solar radiation (R_s) in the entire state of Paraná to five probability density functions (fdp), to choose the best fdp fit and to estimate the probable R_s values at 50%, 75% and 95% probability. Interpolated data from an earlier study, using a 0.25 by 0.25 degree mesh, were used in the analyzes, containing data from 279 specialized points in the State of Paraná. The daily data series of R_s considering the period between 1980 and 2013 was analyzed in a spreadsheet developed for this purpose: grouping the data in ten-year periods; performing frequency distributions of R_s for decennial periods; performing adhesion tests for five pdf 's (Normal, Uniform, Exponential, Triangular and Gamma); selecting best pdf fit with the Kolmogorov-Smirnov test; and estimating probable R_s values at 50%, 75% and 95% probability. With the probable values of the R_s calculated, for decennial periods, maps were made with the Surfer 8.0 geoprocessing program, using the kriging interpolation method. In the analyzes studies, the variation of the incident solar radiation in the regions and climatic types present in Paraná was verified. The results are important to establish reference values for future applications in the various areas (agricultural, environmental, ecological, meteorological and hydrological), where R_s is relevant.

Keywords: Global solar radiation, fdp , probability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

	Página
FIGURA 3.1 – <i>Grid</i> regular de 0,25° x 0,25°, contendo os 279 pontos no Estado do Paraná, em que foram analisados os valores diários de <i>Rs</i> agrupados em decêndios.....	6
FIGURA 3.2 – Classificação climática de Köppen para o Estado do Paraná (ITCG, 2006).....	7
FIGURA 3.3 – Planilha eletrônica automática desenvolvida para calcular os valores prováveis de <i>Rs</i> (SOUZA, 2015).....	8
FIGURA 4.1 – Radiação solar incidente (<i>Rs</i> ; em MJ m ⁻² decêndio ⁻¹) para o 1° decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	14
FIGURA 4.2 – Radiação solar incidente (<i>Rs</i> ; em MJ m ⁻² decêndio ⁻¹) para o 2° decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	15
FIGURA 4.3 – Radiação solar incidente (<i>Rs</i> ; em MJ m ⁻² decêndio ⁻¹) para o 3° decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	16
FIGURA 4.4 – Radiação solar incidente (<i>Rs</i> ; em MJ m ⁻² decêndio ⁻¹) para o 4° decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	17
FIGURA 4.5 – Radiação solar incidente (<i>Rs</i> ; em MJ m ⁻² decêndio ⁻¹) para o 5° decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	18
FIGURA 4.6 – Radiação solar incidente (<i>Rs</i> ; em MJ m ⁻² decêndio ⁻¹) para o 6° decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	19
FIGURA 4.7 – Radiação solar incidente (<i>Rs</i> ; em MJ m ⁻² decêndio ⁻¹) para o 7° decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	20
FIGURA 4.8 – Radiação solar incidente (<i>Rs</i> ; em MJ m ⁻² decêndio ⁻¹) para o 8° decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	21
FIGURA 4.9 – Radiação solar incidente (<i>Rs</i> ; em MJ m ⁻² decêndio ⁻¹) para o 9° decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	22
FIGURA 4.10 – Radiação solar incidente (<i>Rs</i> ; em MJ m ⁻² decêndio ⁻¹) para o 10° decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	23

FIGURA 4.11 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 11º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	24
FIGURA 4.12 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 12º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	25
FIGURA 4.13 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 13º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	26
FIGURA 4.14 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 14º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	27
FIGURA 4.15 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 15º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	28
FIGURA 4.16 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 16º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	29
FIGURA 4.17 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 17º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	30
FIGURA 4.18 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 18º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	31
FIGURA 4.19 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 19º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	32
FIGURA 4.20 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 20º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	33
FIGURA 4.21 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 21º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	34
FIGURA 4.22 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 22º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	35
FIGURA 4.23 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 23º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	36
FIGURA 4.24 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 24º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	37

FIGURA 4.25 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 25° decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	38
FIGURA 4.26 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 26° decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	39
FIGURA 4.27 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 27° decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	40
FIGURA 4.28 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 28° decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	41
FIGURA 4.29 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 29° decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	42
FIGURA 4.30 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 30° decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	43
FIGURA 4.31 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 31° decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	44
FIGURA 4.32 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 32° decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	45
FIGURA 4.33 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 33° decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	46
FIGURA 4.34 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 34° decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	47
FIGURA 4.35 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 35° decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	48
FIGURA 4.36 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 36° decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	49
FIGURA 4.37 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 37° decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.....	50

LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 4.1. Frequência das funções densidade de probabilidade (N – Normal; G – Gama; T – Triangular; E – Exponencial; U – Uniforme) de melhor ajuste para a radiação solar incidente (R_s), para o Estado do Paraná.....	10
TABELA 4.2. Valores médios da $R_{s50\%}$, $R_{s75\%}$ e $R_{s95\%}$ prováveis, desvio padrão e Coeficiente de variação obtido para cada decêndio.....	12

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 RADIAÇÃO SOLAR.....	3
2.2 MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE (R_s).....	4
2.3 TRATAMENTO E UTILIZAÇÃO DE VALORES PROVÁVEIS DE R_s	5
3 MATERIAL E MÉTODOS	6
3.1 LOCAL DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO.....	6
3.2 DADOS METEOROLÓGICOS UTILIZADOS PARA O ESTUDO DA R_s PROVÁVEL.....	6
3.3 TIPOS CLIMÁTICOS BRASILEIROS.....	7
3.3.1 CÁLCULO DOS VALORES PROVÁVEIS DA R_s	7
3.3.2 ELABORAÇÃO DOS MAPAS.....	9
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
5 CONCLUSÃO	51
6 REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

A energia solar vem ganhando relevância no panorama energético para o desenvolvimento sustentável do país. Estudos sobre a radiação solar incidente (R_s) são importantes não apenas para área de energia solar, mas também para aplicações agrícolas, hidrológicas, meteorológicas, ambientais e climatológicas (HENA et al., 2013; HUNT et al., 1998). No setor agrícola, valores de R_s são fundamentais para o planejamento e obtenção da maior eficiência energética nas diversas etapas de produção: seleção das culturas, plantio e colheita, incluindo dimensionamento e operação de sistemas de irrigação e secagem de grãos (PEREIRA et al., 2002).

A energia irradiada pelo Sol é importante para o aquecimento da terra e do ar, formando zonas de alta e baixa pressão, que promovem os movimentos atmosféricos indispensáveis para o regime pluviométrico. Desse modo, a radiação solar configura-se como um dos parâmetros meteorológicos mais importantes e que merece atenção especial. No entanto, mesmo sendo um parâmetro meteorológico relevante, muitas estações meteorológicas não dispõem nem de um piranômetro (ERTAL, 2015; BARATTO, 2016).

Borges et al. (2010) considera que a radiação solar é a força motriz para muitos processos físico-químicos e biológicos que ocorrem no sistema superfície-atmosfera, e constitui-se em importante variável meteorológica em estudos de necessidade hídrica de culturas, modelagem do crescimento e produção vegetal, mudanças climáticas, entre outros.

No setor agropecuário, o uso do R_s vem sendo empregado para determinar características culturais, e aperfeiçoar técnicas de cultivo. Santos et al. (2003) avaliaram a captação e aproveitamento da radiação solar pelas culturas da soja, feijão e espécies de plantas daninhas. Os autores calcularam uma série de índices de crescimento em suas análises: taxa de produção de biomassa seca total, taxa de produção de biomassa seca foliar, índice de área foliar, área foliar específica, razão de massa foliar, razão de área foliar, taxa assimilatória líquida e uso eficiente da radiação. A soja apresentou maior eficiência em converter a R_s em biomassa, e observou-se que o feijão também obteve boas respostas do uso eficiente da radiação.

No estudo da evapotranspiração a R_s atua como fonte de calor sensível para o processo de evaporação, e a variação de sua intensidade produz modificações na temperatura da superfície, sendo importante para o planejamento de projetos de irrigação e estudos climáticos regionais. Assim, valores de R_s podem ser utilizados como auxílio na determinação da classificação de determinada região, quanto à aptidão para implantação de determinada cultura (SOUZA, 2016).

Pereira et al. (2006) consideram que informações sobre os recursos energéticos da radiação solar necessárias para estudos científicos e econômicos podem ser obtidas em:

- Levantamento em alta resolução espacial do potencial energético solar;
- Séries temporais de longa duração de dados de campo com resoluções temporais e espaciais adequadas à realização de estudos de incertezas e tendências;
- Conhecimento sobre a variabilidade das fontes renováveis associada à fatores naturais e antropogênicas.

Considerando a importância de estudos relacionados a radiação teve-se por objetivo no presente trabalho estimar valores decendiais prováveis da radiação solar incidente à 50%, 75% e 95% de probabilidade, considerando dados interpolados formando *Grid* $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, contendo 279 pontos espacializados no Estado do Paraná.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Radiação solar

Pereira et al. (2002) define radiação solar como:

A fonte primária de todos os fenômenos atmosféricos e de processos físicos, químicos e biológicos observados em ecossistemas agrícolas, podendo ser aproveitada sob várias formas, tais como a captura pela biomassa, o aquecimento de ar e água para fins domésticos e industriais, fotoeletricidade para pequenos potenciais e fontes para ciclos termodinâmicos variados.

A radiação solar anual que chega no topo da atmosfera (R_a) se divide em três grupos: baixa, média e alta latitude. Em baixas latitudes, ou nas regiões entre os Trópicos de Câncer e Capricórnio, a insolação apresenta pequena variação sazonal, promovendo temperaturas elevadas ao longo de todo ano – é a situação da maior parte do território brasileiro, com exceção dos Estados da região Sul. Nas latitudes médias, entre $23,5^\circ$ e $66,5^\circ$ de cada hemisfério, a insolação atinge o máximo e mínimo durante os solstícios de Verão e Inverno, com grandes discrepâncias de temperatura entre as estações (TREWARTHA, 1968).

Para as atividades agrícolas, a fração mais importante da R_a é a radiação solar incidente (R_s). A R_s é a quantidade de energia solar que chega à superfície em determinado local e instante, após ser absorvido e dissipado, afetando processos de evaporação da água do solo e transpiração das plantas (KRATZENBERG et al., 2003).

No Brasil, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) dispõe de 321 estações meteorológicas convencionais. Do total de estações, 232 medem a insolação (n) e somente 58 (18,1%) medem a radiação solar incidente (R_s). Além da falta de estações para medir a R_s , as existentes estão centralizadas nas regiões mais desenvolvidas do país. Logo, tem-se grandes áreas agrícolas que não dispõem de dados climáticos completos. É interessante observar que esse fato não difere de outros países, como Estados Unidos, em que Centros de Dados Climáticos apresentam razão 1:100 entre estações que registram radiação e temperatura no país (THORNTON & RUNNING, 1999).

A R_s é usada para estimar a evapotranspiração das culturas e crescimento de plantas (ALMOROX & HONTORIA, 2004). Sua ação é fundamental no processo fotossintético dos vegetais, sendo o fotoperíodo determinante no metabolismo vegetal. O sol emite radiação em diferentes comprimentos de onda, contudo, 99,9% da energia do Sol situa-se entre 0,15 a 4,0 μm , e apenas 44% está na faixa do visível, da qual o espectro do vermelho atua no processo fotossintético (CHANG, 1968).

2.2 Medição da Radiação solar incidente (R_s)

Dados sobre R_s são necessários em diversas áreas, como aquecimento solar, processos de secagem, fornos, células fotovoltaicas, estudos de balanço de energia na atmosfera, análises de carga térmica em edificações, estudos agrícolas e previsões meteorológicas. Ozgoren et al. (2011) consideram que os dados de R_s deveriam ser prontamente disponíveis em qualquer local, visto que seus valores são importantes para estudos científicos, aplicações ambientais, agrícolas e de engenharia.

A instrumentação necessária para coletar dados de R_s é encontrada em estações meteorológicas, como actinógrafos, radiômetros e piranômetros. Os piranômetros são os equipamentos mais utilizados para medir a intensidade da radiação solar que atinge a superfície (DORNELAS et al., 2006).

Apesar da sua significância, a R_s não é amplamente medida devido aos custos e as necessidades de manutenção e calibração dos aparelhos. Nas estações em que a radiação solar é medida observa-se a existência de muitos dados diários faltantes ou fora do esperado, devido as falhas no equipamento e outros problemas (HUNT et al., 1998; ABRAHA & SAVAGE, 2008).

Estudos sobre a variabilidade espacial da radiação solar, em regiões fito geográficas homogêneas, indicaram que a R_s diária média mensal pode ser extrapolada até 200 km de distância, com erros da ordem de 15%, com nível de confiança de 90% (GALLEGOS & LOPARDO, 1988). Obviamente, em regiões geográficas contendo relevos fortemente variáveis, como montanhas e/ou espelhos de água extensos (costa), a extrapolação não é válida. É importante observar também que a extrapolação espacial da radiação solar não

foi suficientemente estudada, devido à falta de dados confiáveis e variabilidade dos locais pesquisados.

2.3 Tratamento e utilização de valores prováveis

Os valores de R_s podem ser medidos em estações meteorológicas, ou estimados com equações como a de Hargreaves & Samani, e Allen. A R_s não é amplamente medida devido aos custos e necessidades de manutenção e calibração dos equipamentos.

A obtenção dos parâmetros das funções densidade de probabilidade (f_{dp}), com o melhor ajuste aos dados estudados são muito úteis para o planejamento de atividades no meio rural e urbano (CARGNELUTTI et al., 2004), inclusive a obtenção de valores prováveis. No entanto, os cálculos dos valores prováveis necessitam de séries longas e consistentes de dados climáticos, para várias regiões e épocas do ano, a fim de ajustar melhor os valores em testes de aderência e melhorar a confiabilidade.

Frizzone et al. (2005) consideram que a probabilidade de 75% é considerada adequada para fins agropecuários. Vale ressaltar, no entanto, que uma vez determinados os parâmetros e a f_{dp} de melhor ajuste, os valores prováveis da variável estudada pode ser facilmente obtida para diferentes níveis de probabilidade.

Muitos pesquisadores calculam os valores prováveis a partir de planilha eletrônicas ou programas específicos, como os elaborados por Toledo et al. (2012). A utilização de *softwares* para esta finalidade tem maior rendimento, permitindo realizar os cálculos em menor tempo e com maior confiabilidade dos resultados. Geralmente tem-se menor possibilidade de erros em processos automatizados do que em cálculos manuais.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local de realização do trabalho

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas (LAMOSA), no Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná (UFPR), em Curitiba, Paraná.

3.2 Dados meteorológicos utilizados para o estudo da R_s provável

Foram utilizados dados das estações meteorológicas automáticas distribuídas em todo o Estado, que posteriormente foram interpolados em estudo anterior (XAVIER et al., 2015) para gerar um *grid* regular de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, totalizando 279 pontos para o Estado do Paraná (FIGURA 3.1). A série compreendeu o período entre 1980 a 2013.

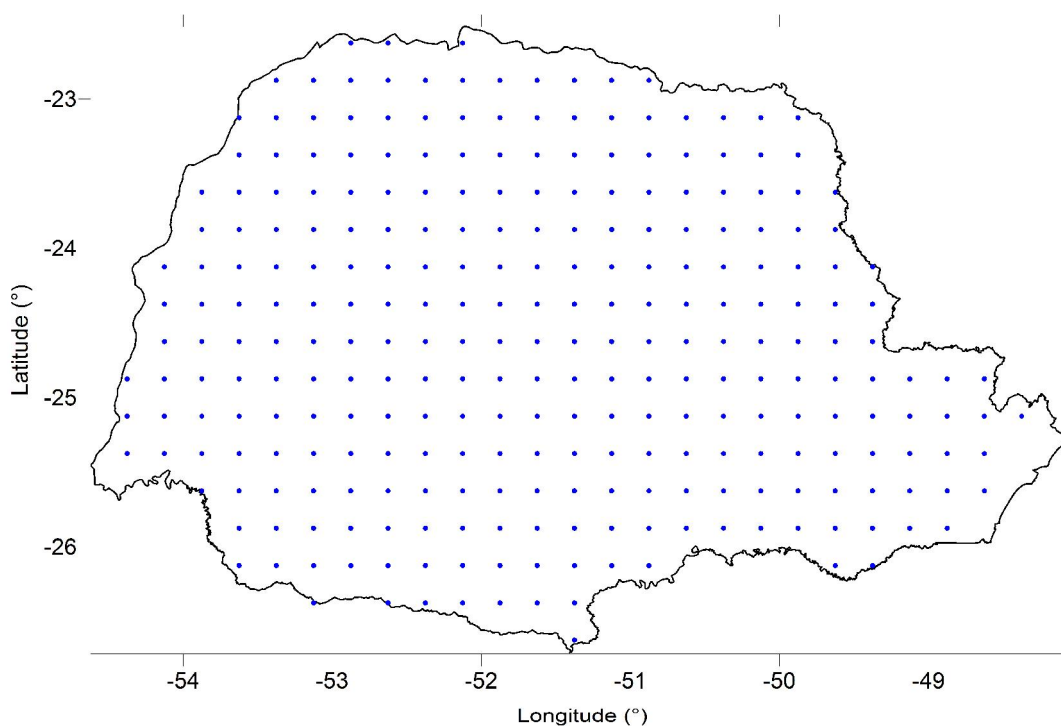


FIGURA 3.1 – *Grid* regular de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, contendo os 279 pontos no Estado do Paraná, em que foram analisados os valores diários de R_s agrupados em decêndios.

3.3 Tipos climáticos do Paraná

De acordo com a classificação de Köppen o Estado do Paraná (FIGURA 3.2) apresenta nove tipos climáticos, tendo predominância os tipos Cfa e Cfb. O clima Subtropical engloba 13,7% do território brasileiro, sendo predominante na região Sul. Abaixo e acima do trópico de Capricórnio há predominância de climas subtropicais e tropicais, respectivamente.

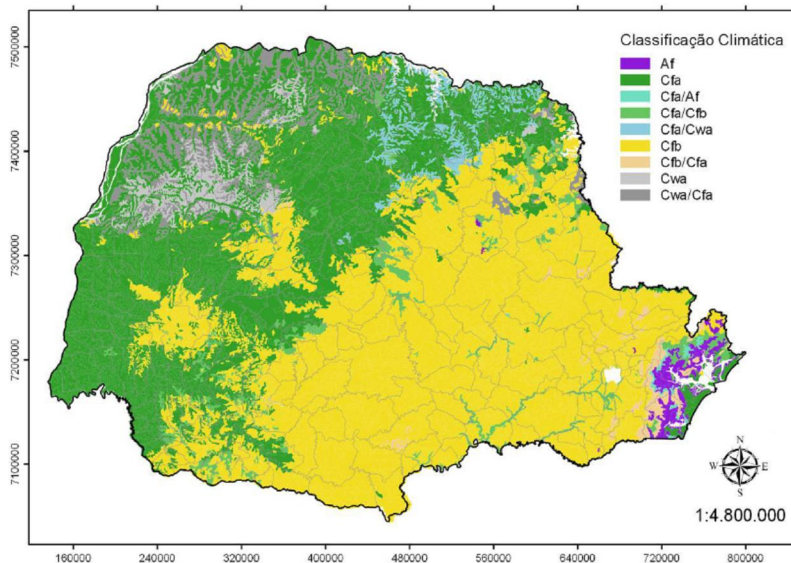


FIGURA 3.2 – Classificação climática de Köppen para o Estado do Paraná (ITCG, 2006).

3.3.1 Cálculo dos valores prováveis da R_s

Para o cálculo da radiação solar incidente (R_s) provável foram seguidos os procedimentos metodológicos de Souza et al. (2013):

- a) Agrupamento dos valores diários da R_s em períodos de dez dias (decêndios);
- b) Estabelecimento das distribuições de frequência com os dados das séries observadas;
- c) Cálculo dos parâmetros estatísticos das funções densidade de probabilidade (f_{dp}) Exponencial, Gama, Normal, Triangular e Uniforme com as séries de valores decendiais;
- d) Verificação da aderência dos valores decendiais às cinco f_{dp} 's, com o teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade;

e) Escolha da *fdp* que melhor se ajustou a cada decêndio observado;

f) Determinação dos valores prováveis da *Rs* à 50%, 75% e 95% de probabilidade (*Rs*_{50%}, *Rs*_{75%} e *Rs*_{95%}).

Os valores diários do *Rs* foram organizados em 37 decêndios por ano. O trigésimo sétimo decêndio de cada ano foi composto pelos cinco ou seis (ano bissexto) últimos dias do ano.

Todo o processo de cálculo para obter os parâmetros da *fdp*'s de melhor ajuste, bem como realizar os cálculos dos valores prováveis de *Rs*_{50%}, *Rs*_{75%} e *Rs*_{95%}, foi realizado com o auxílio de uma planilha eletrônica (Figura 3.3) elaborada especialmente para essa finalidade (SOUZA, 2015). Como entrada, a planilha necessitou dos dados diários da série de valores de *Rs*, previamente interpolados por Xavier et al. (2016).

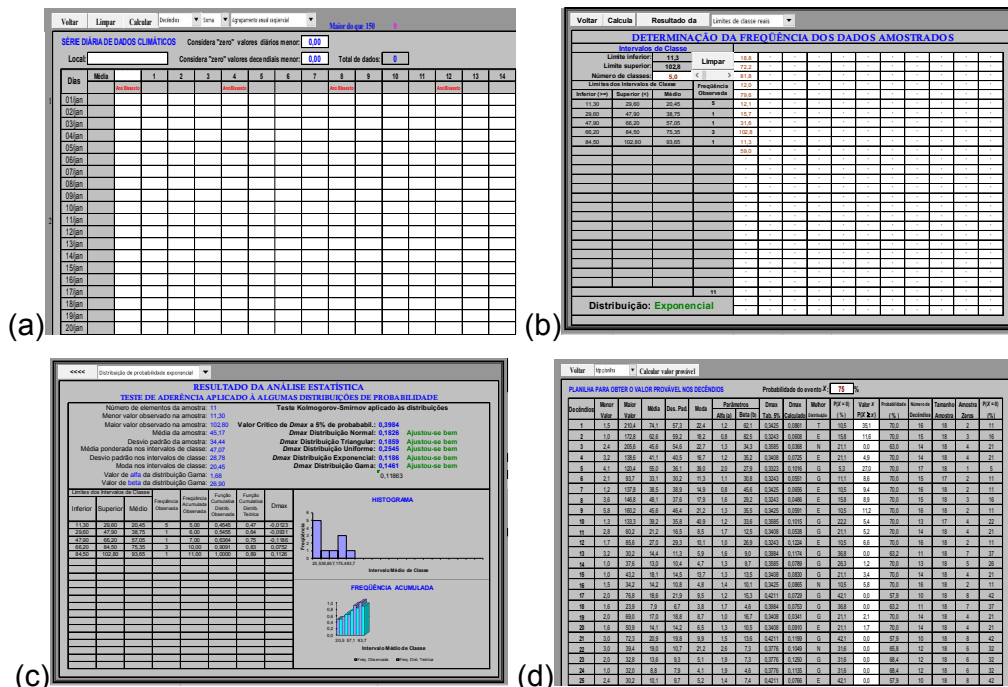


FIGURA 3.3 – Planilha eletrônica automática utilizada para: a) Entrada dos valores diários da *Rs*; b) Verificação de inconsistências e agrupamento dos valores de *Rs* em períodos decendiais; c) Obter os parâmetros da *fdp*'s e escolha da *fdp* de melhor ajuste; e, d) Realizar os cálculos dos valores prováveis de *Rs*_{50%}, *Rs*_{75%} e *Rs*_{95%} (SOUZA, 2015).

3.3.2 Elaboração dos mapas

Com as somas dos valores decendiais foram gerados 37 mapas para cada um dos valores prováveis de R_s ($R_{s50\%}$, $R_{s75\%}$ e $R_{s95\%}$), totalizando 111 mapas. Os mapas foram processados no programa de geoprocessamento *Surfer* 8.0. O método utilizado para a interpolação dos dados foi a *krigagem*, utilizando *grid* de 279 pontos. Foram geradas curvas com os valores prováveis de R_s , englobando grande parte dos valores obtidos para o Paraná. A escala variou da cor amarela a vermelha. A escala para estabelecer os mapas com os valores de $R_{s50\%}$ e $R_{s75\%}$ variou de 80 a 280 MJ m⁻² decêndio⁻¹, enquanto para melhor visualização a $R_{s95\%}$ variou de 50 a 200 MJ m⁻² decêndio⁻¹.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A frequência das funções densidade de probabilidade de melhor ajuste para a radiação solar incidente (R_s), para o Estado do Paraná (Tabela 4.1) indicou 61,32% dos ajustes para a *fdp* Normal, seguidos pela Gama (24,78%), triangular (8,88%), Uniforme (4,98%), Exponencial (0,04%).

TABELA 4.1. Frequência das funções densidade de probabilidade (N – Normal; G – Gama; T – Triangular; E – Exponencial; U – Uniforme) de melhor ajuste para a radiação solar incidente (R_s), para o Estado do Paraná.

Decêndios	----- Melhor ajuste para R_s -----				
	N	G	T	E	U
1	175	10	94	0	0
2	98	120	3	0	58
3	207	47	25	0	0
4	98	146	16	0	19
5	123	135	2	0	19
6	233	34	12	0	0
7	177	70	26	2	4
8	267	9	1	2	0
9	172	83	12	0	12
10	141	66	59	0	13
11	168	103	6	0	2
12	164	62	39	0	14
13	196	51	8	0	24
14	155	111	1	0	12
15	167	27	16	0	69
16	225	19	35	0	0
17	178	84	11	0	6
18	237	15	27	0	0
19	97	113	20	0	49
20	187	27	65	0	0
21	239	19	21	0	0
22	150	92	25	0	12
23	183	76	17	0	3
24	173	23	83	0	0
25	147	90	20	0	22
26	105	127	12	0	35
27	226	34	19	0	0
28	173	67	19	0	20
29	192	61	23	0	3
30	194	77	5	0	3
31	146	116	17	0	0
32	140	117	22	0	0
33	207	16	56	0	0
34	196	12	71	0	0
35	117	64	6	0	92
36	109	137	14	0	19
37	201	77	1	0	0
Soma	6279	2537	909	4	510
Porcentagem (%)	61,32	24,78	8,88	0,04	4,98

Cargnelutti et al., (2004) também realizou estudos envolvendo ajustes de *fdp's* à série de dados de *Rs*. Após análises dos resultados obtidos, o autor considerou que:

“... entre as distribuições testadas, os parâmetros de qualquer uma delas poderiam ser utilizados para representar o comportamento da radiação solar global média decendial. Porém, a obtenção da estimativa dos parâmetros dessas distribuições e a estimativa das probabilidades diferem quanto ao grau de dificuldade. Então, convém verificar qual das funções estudadas tem o melhor ajuste, podendo a mesma coincidir com uma distribuição que apresente menor dificuldade de obtenção dos parâmetros e ainda, facilidade nas estimativas de probabilidades.”

A planilha automática utilizada no presente estudo realizou os cálculos dos valores prováveis conforme à *fdp* de melhor ajuste. Desta forma, acredita-se que os resultados obtidos são bem consistentes.

Os valores médios prováveis da $Rs_{50\%}$, $Rs_{75\%}$ e $Rs_{95\%}$, em que a planilha seleciona automaticamente a *fdp* de melhor ajuste para realizar o cálculo (obtidas com a média de todos os pontos), encontram-se apresentados e resumidos na Tabelas 4.2. Os parâmetros média, desvio padrão e coeficiente de variação, possibilitam a análise crítica dos valores que se encontram nos mapas.

O valor médio anual, conforme esperado, reduziu a medida que ocorreu o aumento da probabilidade, sendo $Rs_{50\%} = 6049,85 \text{ MJ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$, $Rs_{75\%} = 5492,68 \text{ MJ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$, $Rs_{95\%} = 4707,06 \text{ MJ m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$. O valor médio provável decendial foi de $Rs_{50\%} = 163,51 \text{ MJ m}^{-2} \text{ decêndio}^{-1}$, $Rs_{75\%} = 148,45 \text{ MJ m}^{-2} \text{ decêndio}^{-1}$ e $Rs_{95\%} = 127,22 \text{ MJ m}^{-2} \text{ decêndio}^{-1}$.

A $Rs_{50\%}$ apresentou os menores coeficientes de variação (CV), tendo CV médio de 7,84%, mínimo de 4,6% e máximo de 20%. A $Rs_{75\%}$ apresentou CV médio de 8,73%, mínimo de 6,1% e máximo de 17,1%. E a $Rs_{95\%}$ apresentou CV médio de 9,97%, mínimo de 5,3% e máximo de 14%.

Os resultados dispostos na Tabela 4.2 permitem observar que valores prováveis da *Rs* possuem grande amplitude, devido à vários fatores, como clima, temperatura e umidade.

TABELA 4.2. Valores médios ($\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) da $R_{s50\%}$, $R_{s75\%}$ e $R_{s95\%}$ prováveis, desvio padrão ($\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) e coeficiente de variação obtido para cada decêndio.

-----Rs50%-----				-----Rs75%-----				-----Rs95%-----			
Decendio	Valor medio	Desvio	Coeficiente de	Decendio	Valor medio	Desvio	Coeficiente de	Decendio	Valor medio	Desvio	Coeficiente de
	Provavel	padrao	variação(%)		Provavel	padrao	variação(%)		Provavel	padrao	variação(%)
1	209,87	24,551	11,698	1	189,72	19,658	10,362	1	161,04	13,234	8,218
2	207,11	9,506	4,590	2	186,58	11,352	6,084	2	161,07	8,601	5,340
3	200,42	10,767	5,372	3	182,80	12,575	6,879	3	157,77	11,556	7,325
4	200,35	9,419	4,701	4	181,82	11,025	6,063	4	157,52	9,573	6,077
5	192,26	9,490	4,936	5	174,70	10,870	6,222	5	151,21	9,632	6,370
6	187,31	10,330	5,515	6	172,48	10,622	6,159	6	151,22	9,226	6,101
7	190,83	14,291	7,489	7	174,80	14,451	8,267	7	152,56	16,037	10,512
8	178,10	10,845	6,089	8	162,68	13,162	8,090	8	140,20	15,625	11,145
9	172,92	12,813	7,410	9	156,92	13,710	8,737	9	134,78	12,899	9,571
10	166,50	12,481	7,496	10	154,93	11,513	7,431	10	138,78	10,299	7,421
11	152,27	9,690	6,364	11	138,61	10,486	7,565	11	118,95	11,193	9,410
12	141,15	12,075	8,555	12	126,15	11,795	9,350	12	104,67	11,514	11,000
13	134,98	8,535	6,324	13	121,80	9,039	7,421	13	103,66	9,294	8,966
14	120,71	8,926	7,394	14	109,30	9,741	8,912	14	93,16	10,637	11,418
15	118,13	7,250	6,137	15	105,65	8,914	8,437	15	89,75	8,804	9,810
16	112,95	7,429	6,577	16	101,25	8,239	8,137	16	84,21	8,784	10,430
17	110,35	8,767	7,944	17	99,94	9,256	9,262	17	85,00	10,031	11,802
18	105,89	8,203	7,747	18	93,52	8,722	9,326	18	75,52	8,575	11,355
19	111,02	9,989	8,998	19	100,46	10,021	9,975	19	86,53	11,149	12,884
20	114,58	22,967	20,044	20	103,31	17,659	17,093	20	86,62	12,109	13,979
21	127,71	8,949	7,007	21	117,18	9,789	8,353	21	101,65	11,498	11,311
22	132,85	12,355	9,300	22	121,06	11,435	9,446	22	104,54	11,563	11,061
23	139,53	12,953	9,283	23	124,92	14,433	11,554	23	103,00	11,392	11,061
24	148,62	16,187	10,891	24	134,40	14,369	10,691	24	113,93	13,532	11,877
25	153,20	13,351	8,714	25	139,02	11,045	7,945	25	119,39	10,376	8,691
26	155,39	11,284	7,261	26	139,11	12,924	9,290	26	117,72	14,032	11,920
27	160,61	12,571	7,827	27	143,77	12,798	8,902	27	119,33	12,466	10,446
28	169,44	22,644	13,364	28	152,59	24,769	16,232	28	125,68	15,170	12,070
29	176,60	13,475	7,630	29	162,16	13,440	8,288	29	141,15	15,255	10,808
30	187,22	16,814	8,981	30	169,86	15,643	9,209	30	145,12	15,111	10,412
31	199,06	14,626	7,347	31	182,85	14,472	7,915	31	159,09	17,168	10,791
32	207,06	14,104	6,812	32	188,37	15,396	8,173	32	161,57	18,726	11,590
33	217,29	12,081	5,560	33	199,26	13,408	6,729	33	173,00	16,754	9,684
34	216,20	20,853	9,645	34	197,99	18,784	9,487	34	170,48	15,779	9,256
35	207,12	13,311	6,427	35	189,40	12,473	6,586	35	167,11	16,193	9,690
36	215,17	15,682	7,288	36	198,01	14,064	7,103	36	174,34	15,849	9,091
37	109,07	5,679	5,207	37	95,30	6,968	7,311	37	75,75	7,516	9,923
Media	163,51	12,57	7,84	Media	148,45	12,68	8,73	Media	127,22	12,36	9,97
Soma	6049,85	465,24	289,92	Soma	5492,68	469,02	322,99	Soma	4707,06	457,15	368,81

O período de inverno apresentou os menores valores prováveis de R_s , enquanto o verão apresentou os maiores valores prováveis. O valor mínimo de R_s é encontrado na costa do Sul do Brasil, que possui grandes índices de

precipitação. O clima temperado e a influência de sistemas frios, associados com o anticiclone polar Antártico, contribuem com o aumento da nebulosidade na região, especialmente no inverno (MARTINS et al., 2008).

A *Rs* é afetada pela nebulosidade, pois quanto maior a nebulosidade menor o total de horas de insolação direta. As regiões que possui clima com baixa precipitação anual e menor nebulosidade no Paraná, tenderam aos maiores valores de *Rs* (INMET, 2007).

Observou-se aumento da *Rs* no sentido leste-oeste do Estado do Paraná, sendo o litoral paranaense a região com a menor *Rs*. A região litorânea do Estado possui menores altitudes no relevo, apresenta maior nebulosidade, maior precipitação pluviométrica e, conseqüentemente, menor *Rs* (ALVARES et al., 2013).

Analisando os dados e imagens é possível relacionar a variação da *Rs* conforme os climas da classificação de Köppen. Obteve-se os maiores valores de *Rs* no clima Cfa.

Foi possível observar também que ocorreram pequenos desvios pontuais, identificados nas manchas destoantes que estão apresentadas nos mapas gerados, devido à prováveis erros de dados ou processo de interpolação que possam ter acontecido. Atribui-se que são erros pois desviam muito dos valores dos pontos laterais, ou são valores destoante da série histórica, que resultam em manchas na escala colorimétrica dos mapas gerados, ocorrendo em alguns casos da mudança da probabilidade ocultar o erro.

A maioria dos mapas apresentou três escalas de cores (no mínimo), mantendo o sentido de aumento de leste para oeste em todos os mapas. A região noroeste e oeste apresentou sempre a maior média nos períodos quentes, e nos períodos mais frios apresentou maior homogeneidade com as demais regiões.

Nas Figura 4.1 a 4.37 encontram-se os mapas gerados com a interpolação dos 279 pontos do *Grid* de dados de *Rs* provável (*Rs*_{50%}, *Rs*_{75%} e *Rs*_{95%}) para o Estado do Paraná, nos 37 decêndios do ano.

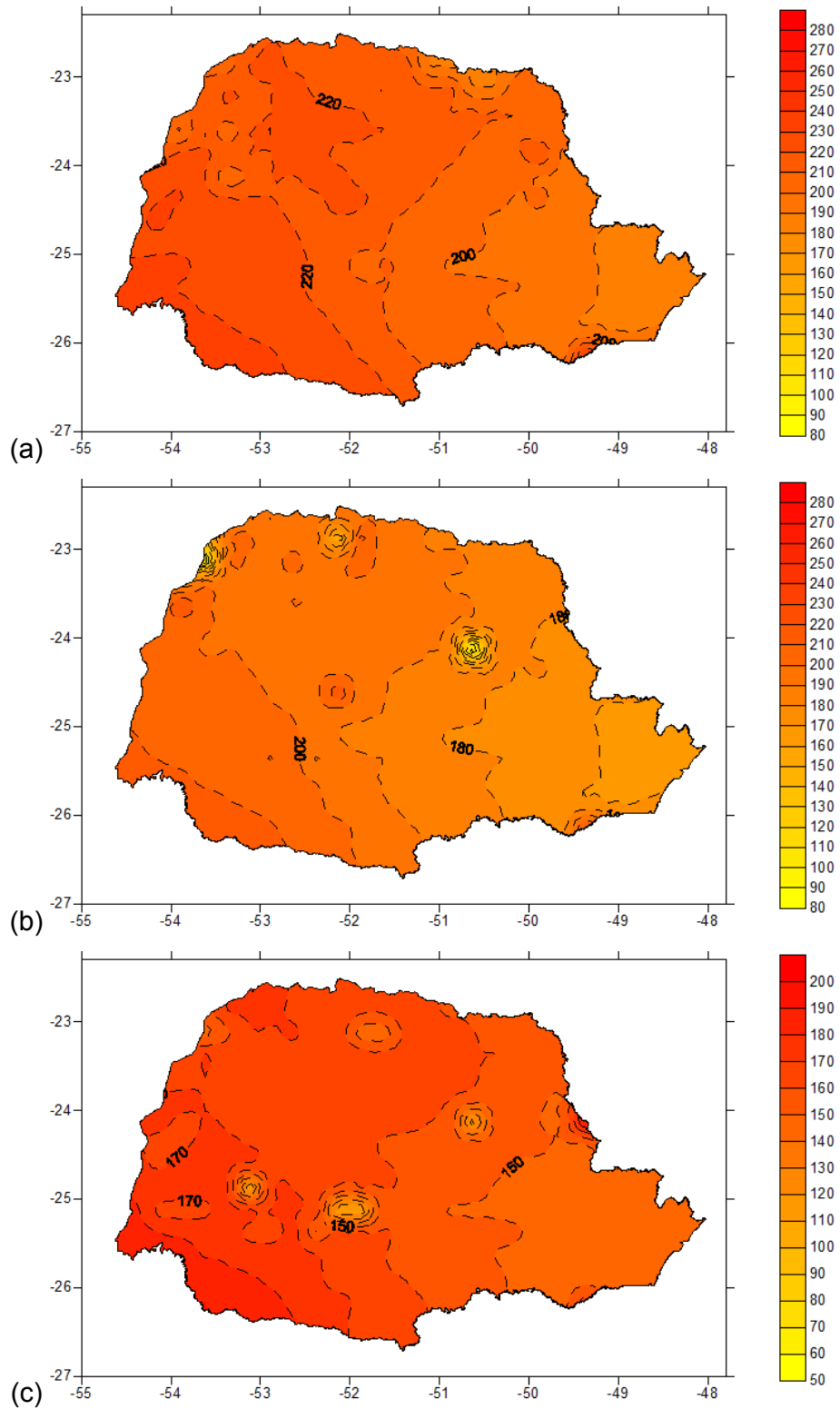


FIGURA 4.1 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{dec}^{-1}$) para o 1º decênio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

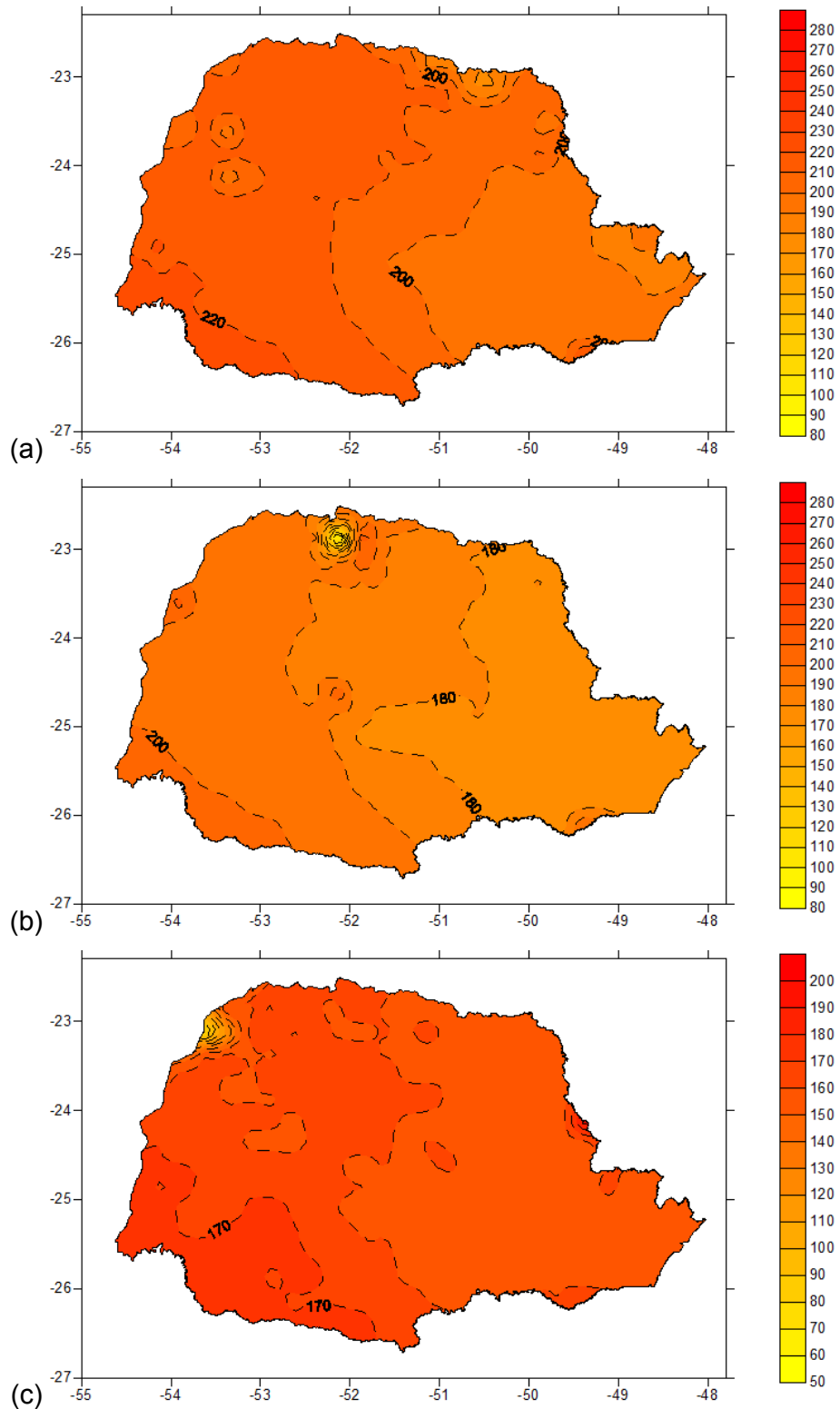


FIGURA 4.2 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{dec}^{-1}$) para o 2º decênio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

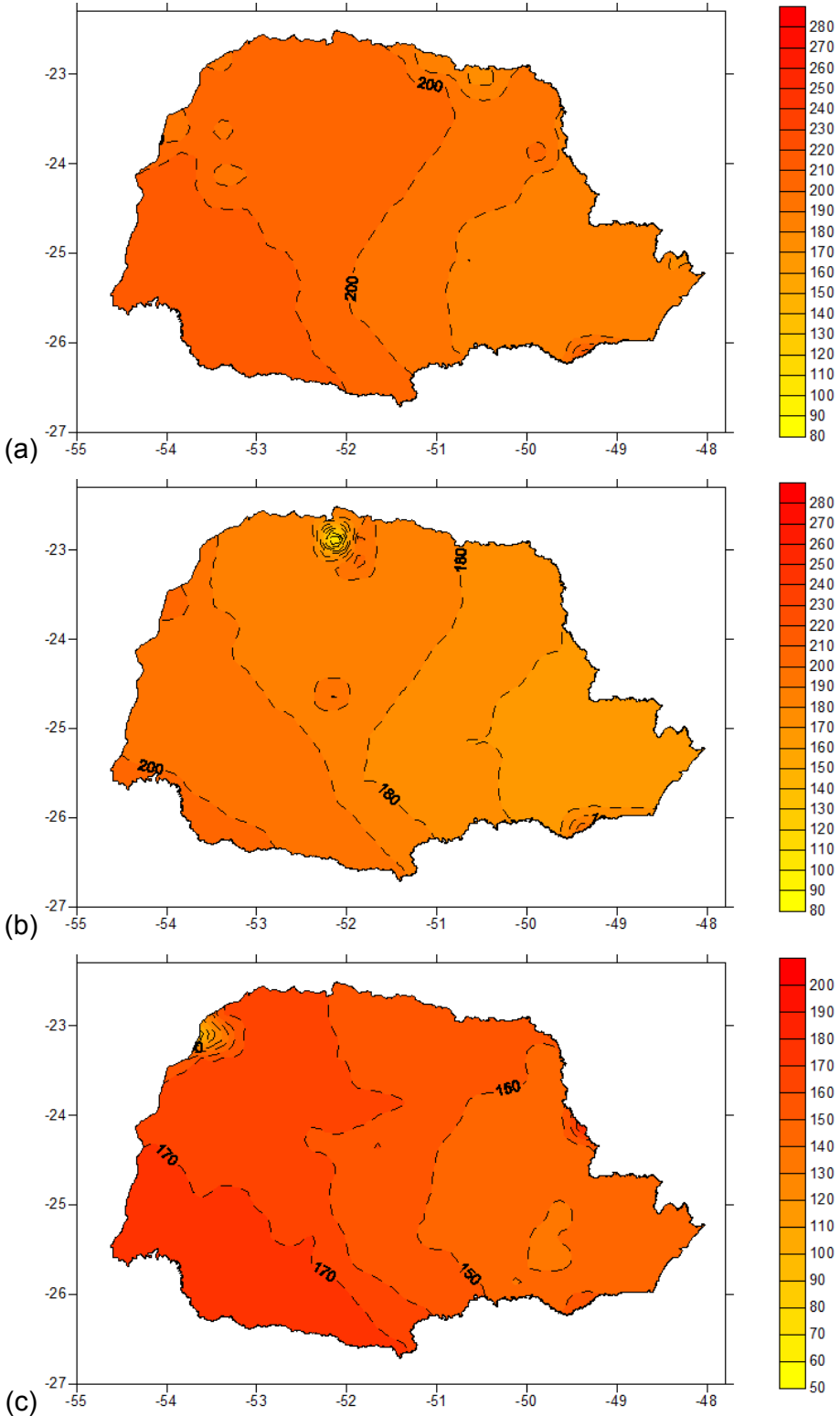


FIGURA 4.3 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{dec}^{-1}$) para o 3º decênio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

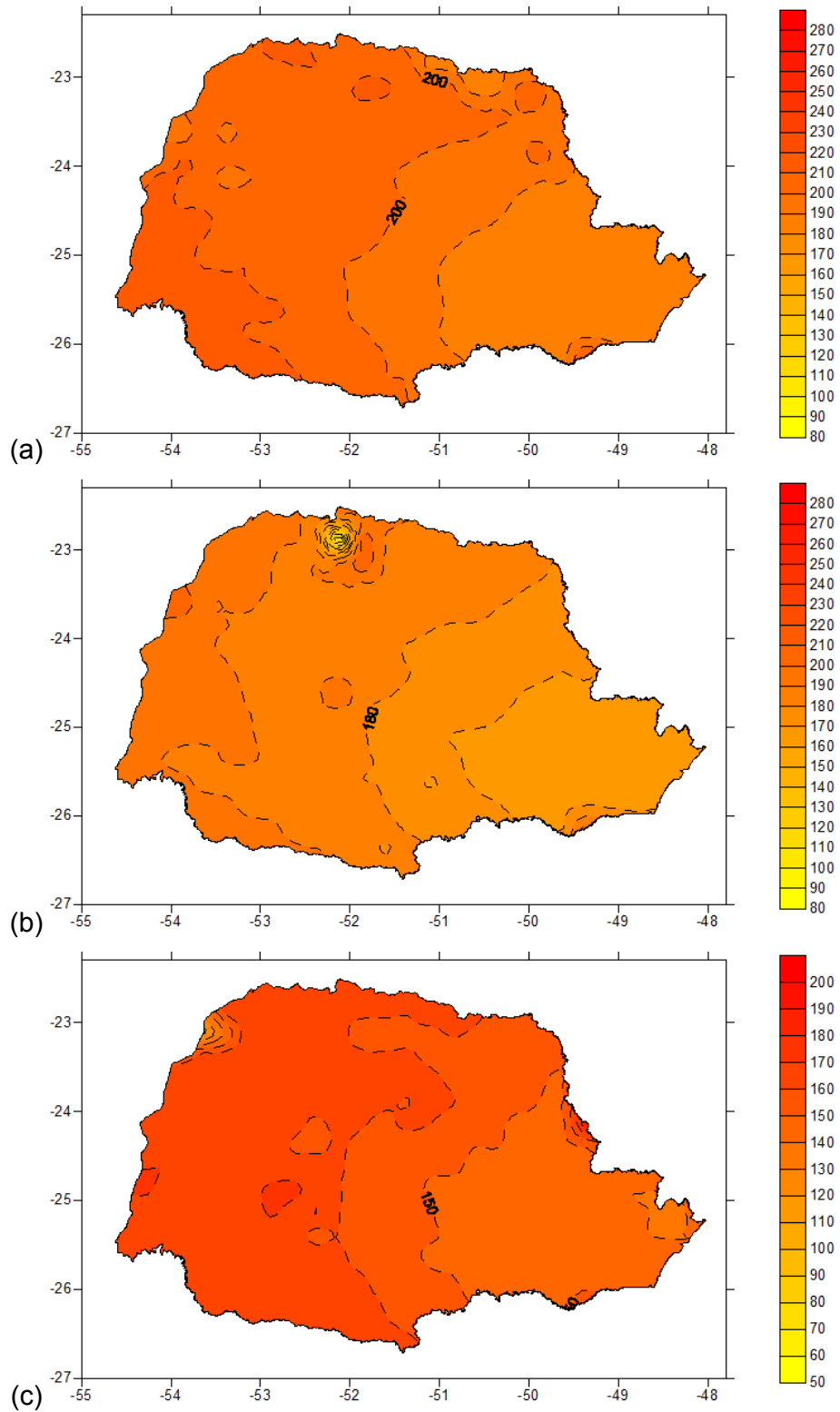


FIGURA 4.4 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 4º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

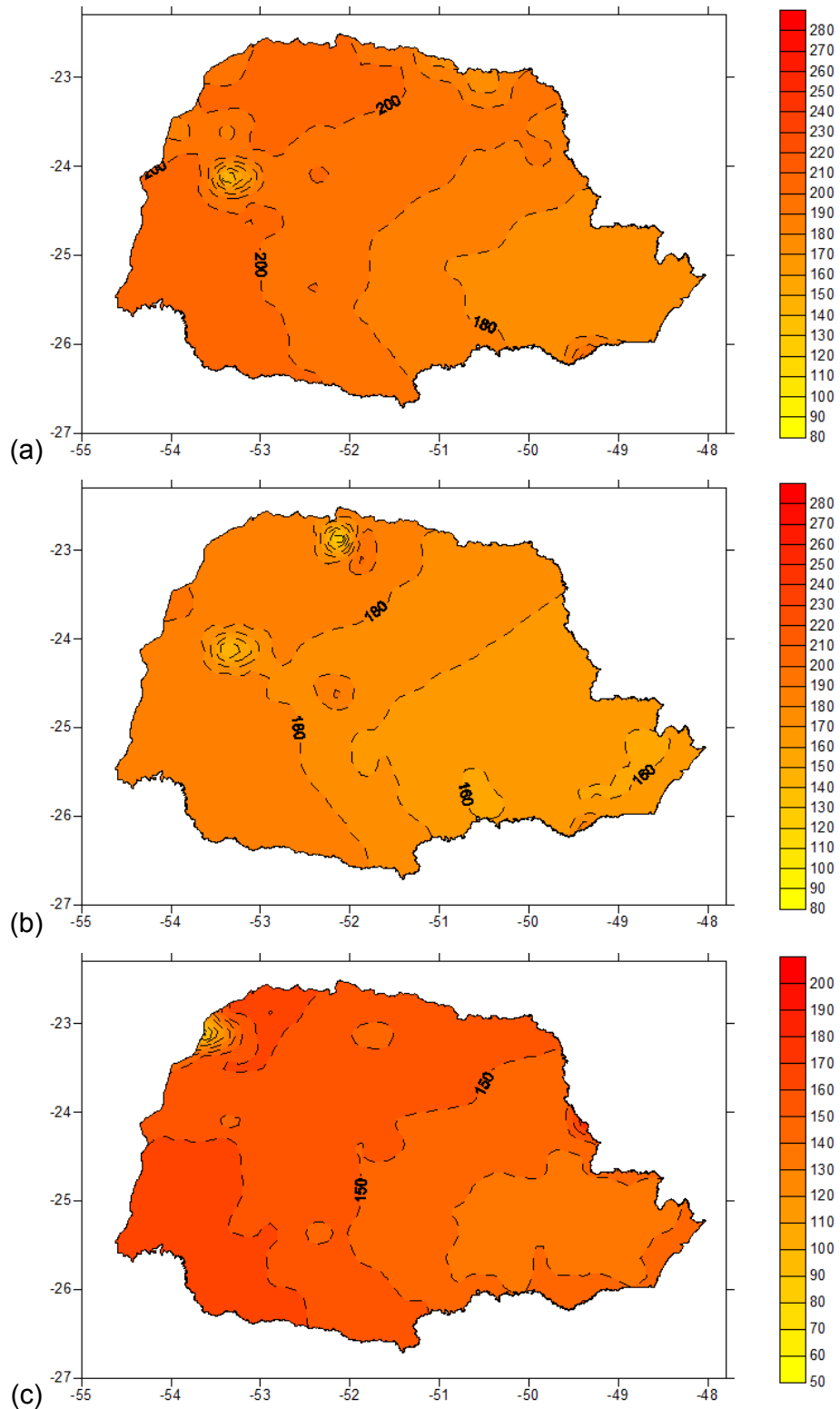


FIGURA 4.5 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{dec}^{-1}$) para o 5º decênio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

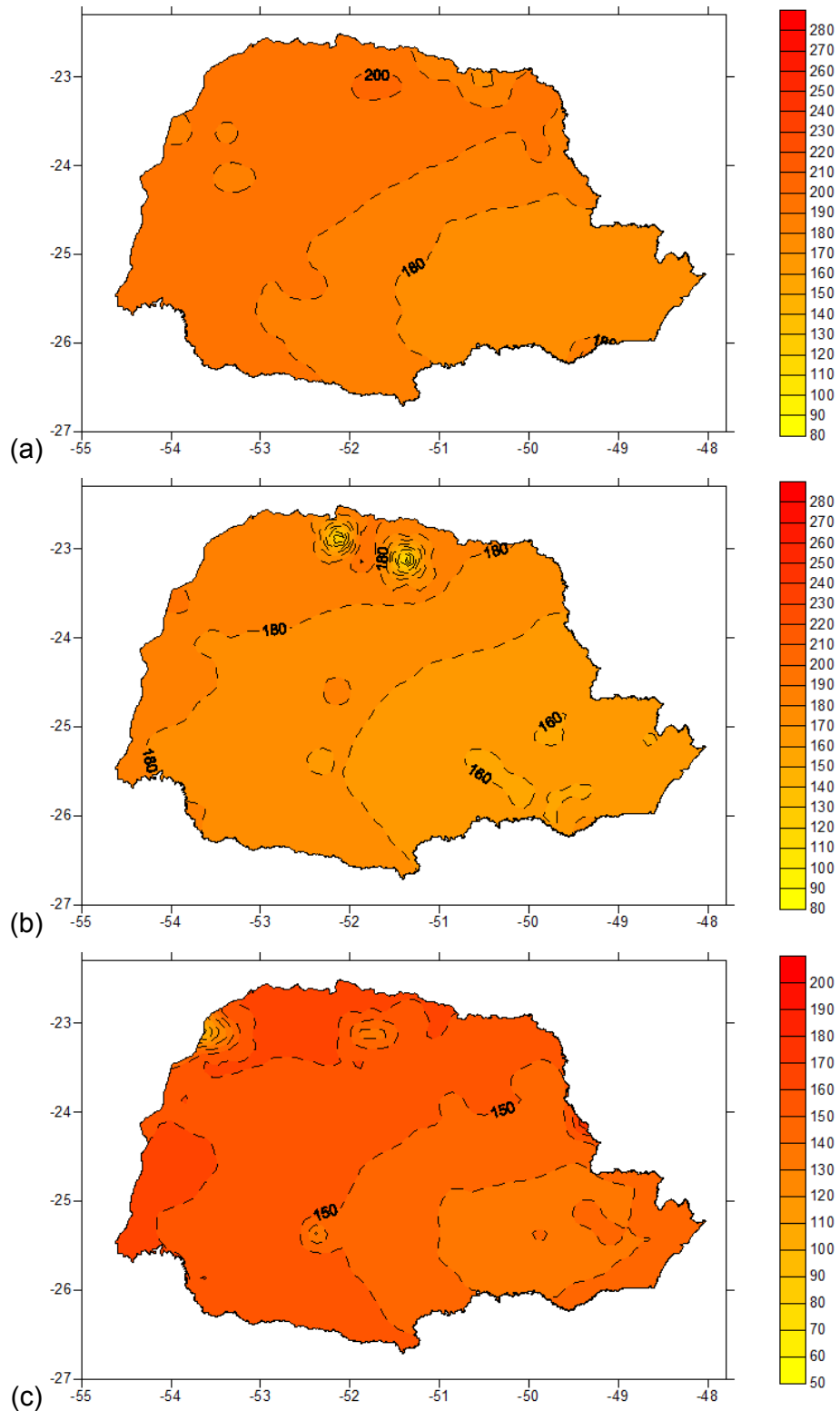


FIGURA 4.6 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{dec}^{-1}$) para o 6º decênio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

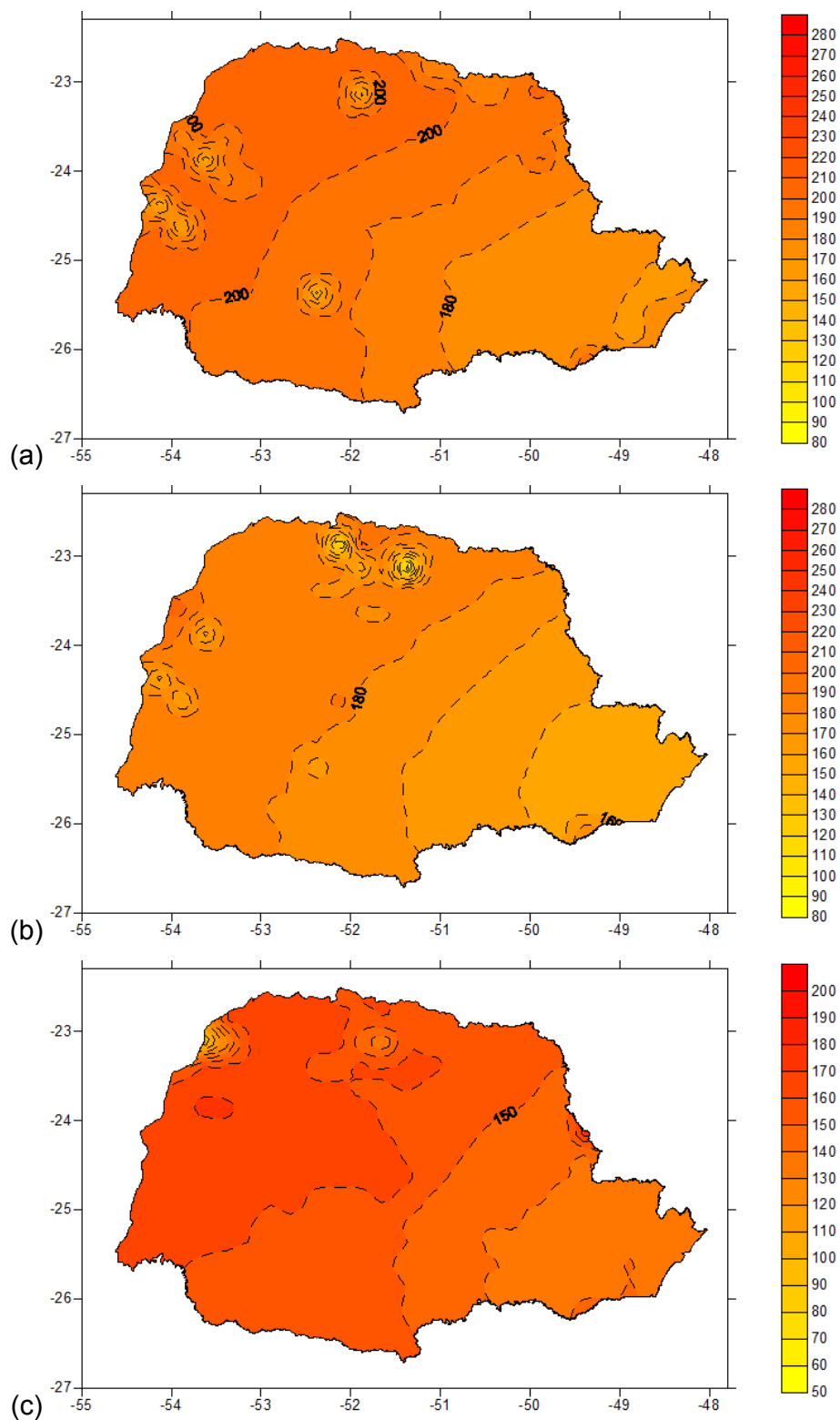


FIGURA 4.7 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 7º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

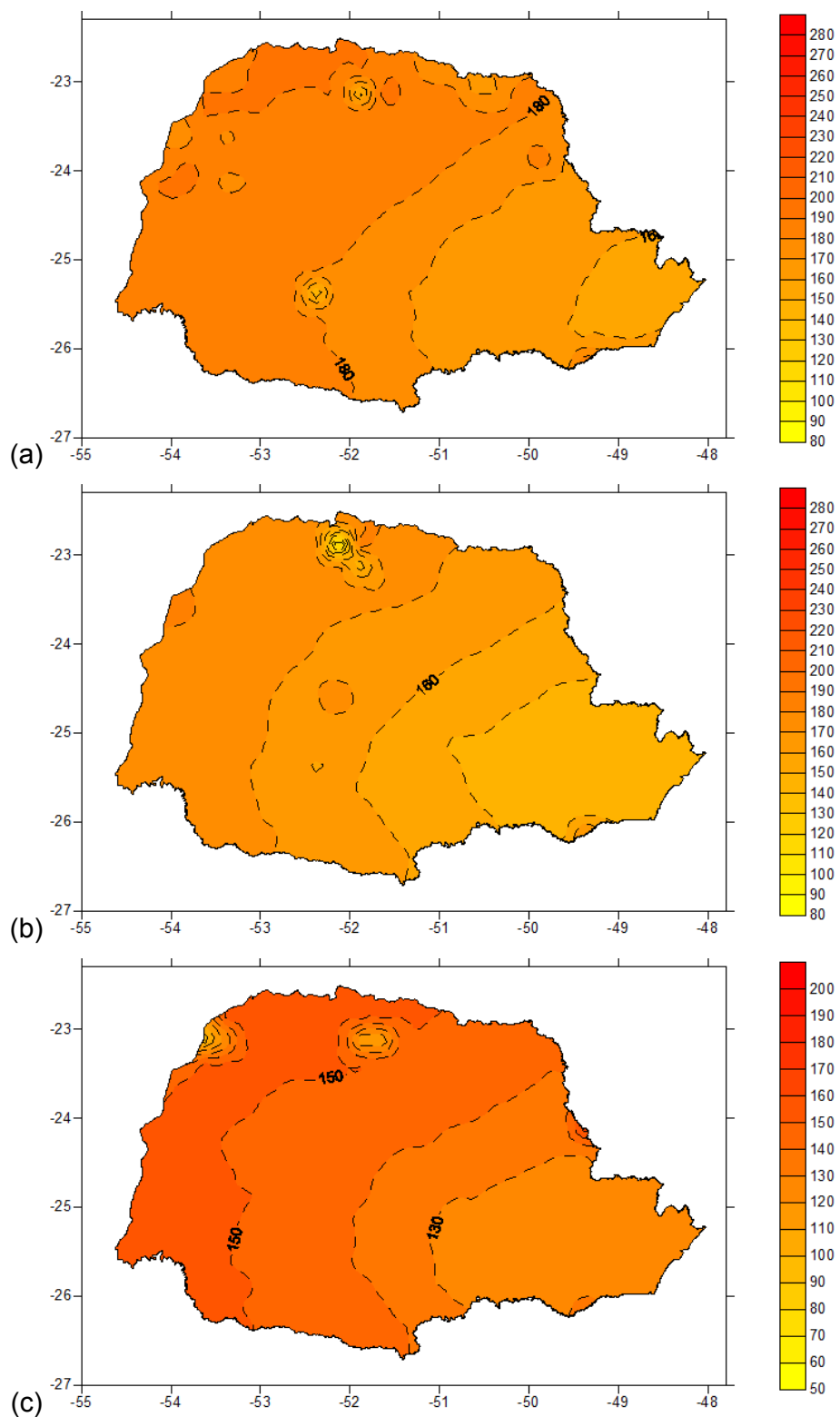


FIGURA 4.8 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{dec}^{-1}$) para o 8º decênio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

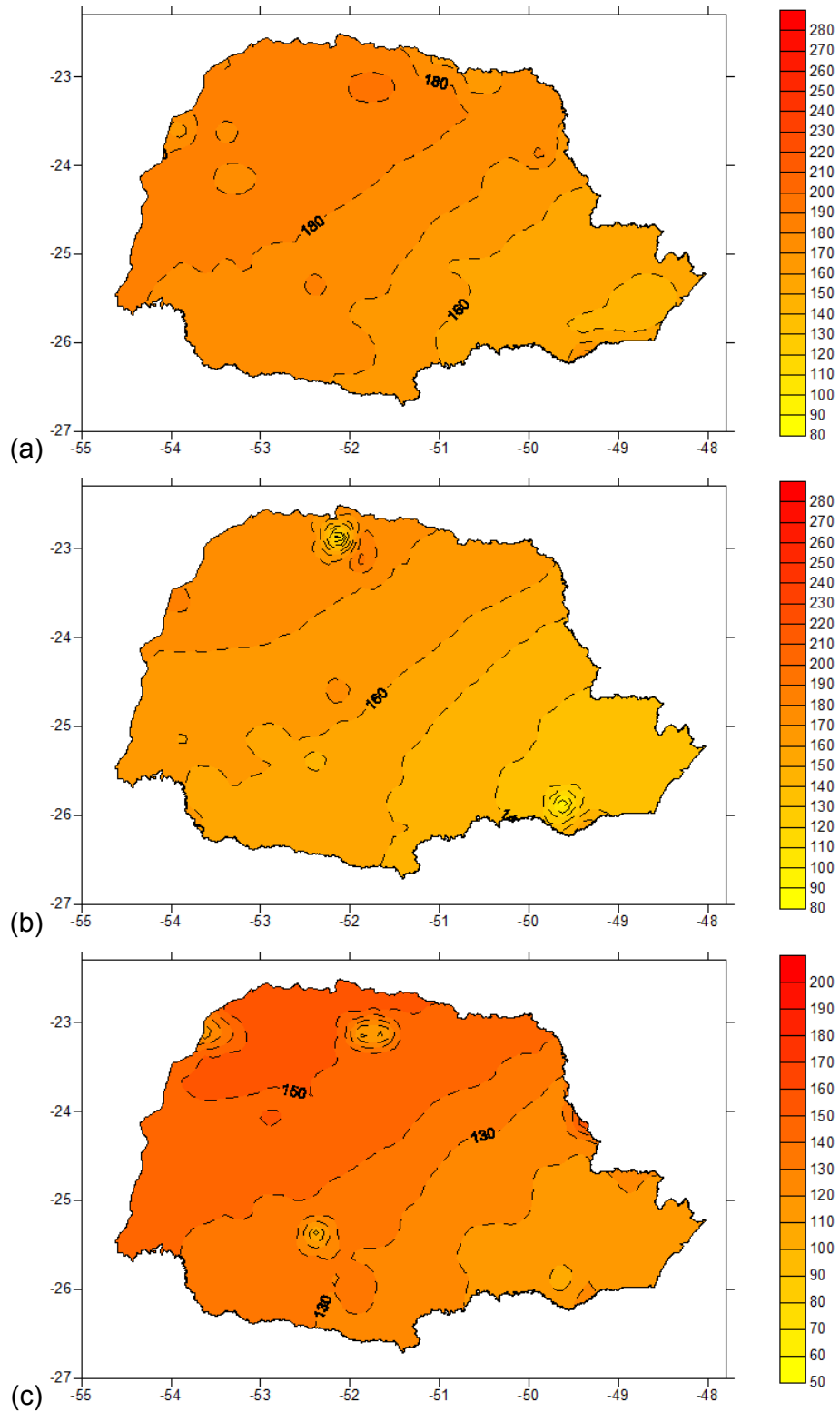


FIGURA 4.9 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{dec}^{-1}$) para o 9º decênio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

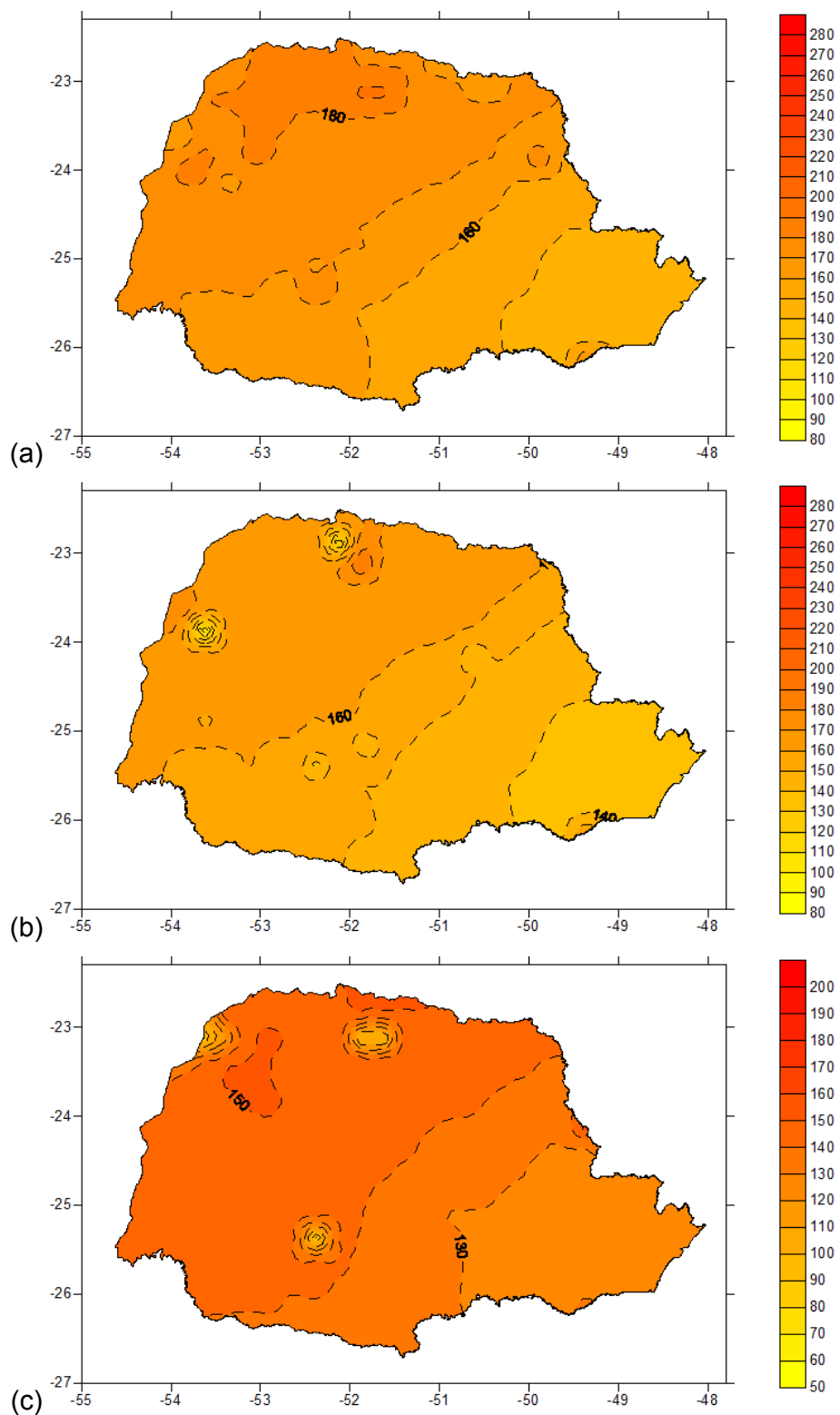


FIGURA 4.10 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 10º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

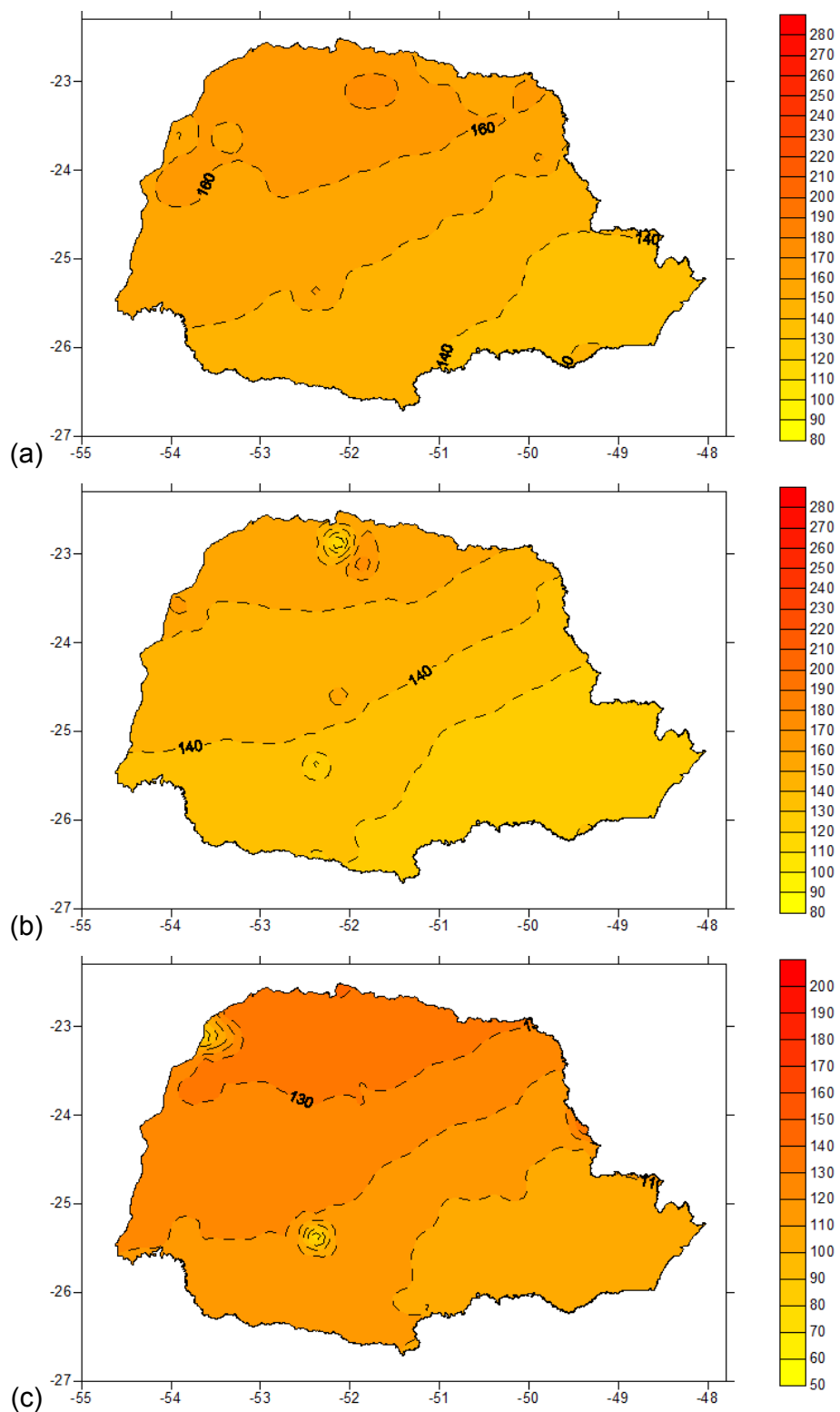


FIGURA 4.11 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{dec}^{-1}$) para o 11º decênio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

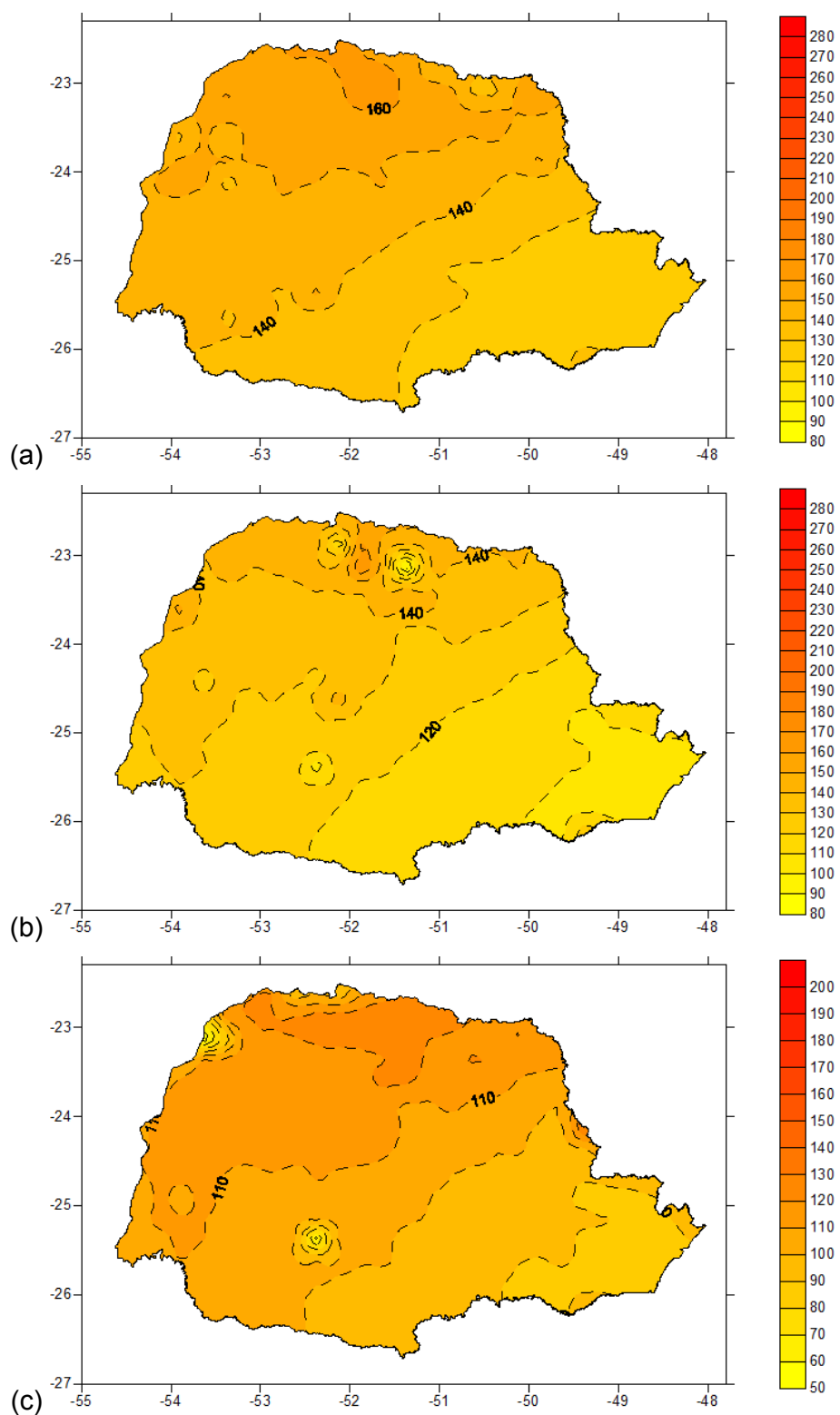


FIGURA 4.12 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 12º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

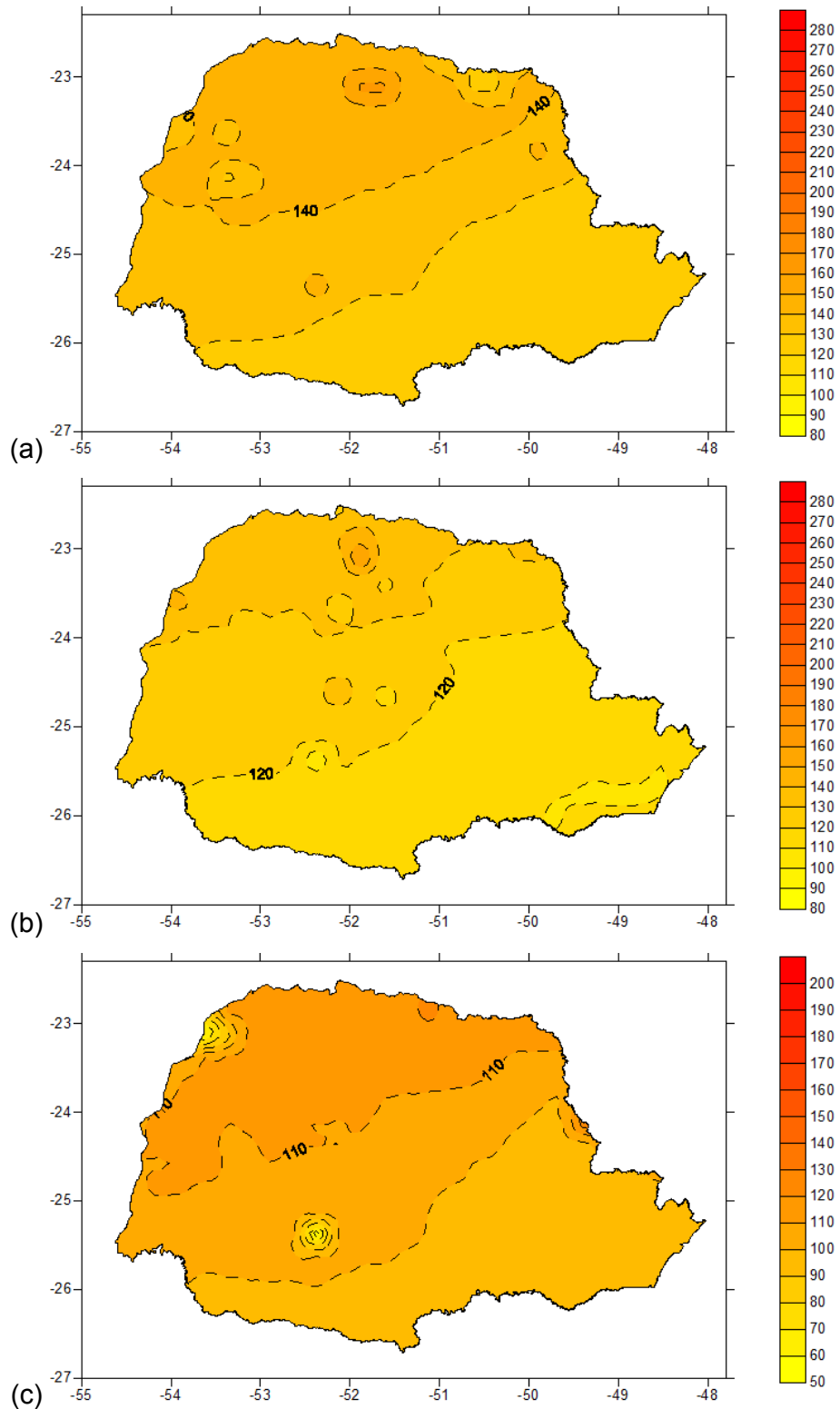


FIGURA 4.13 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 13º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

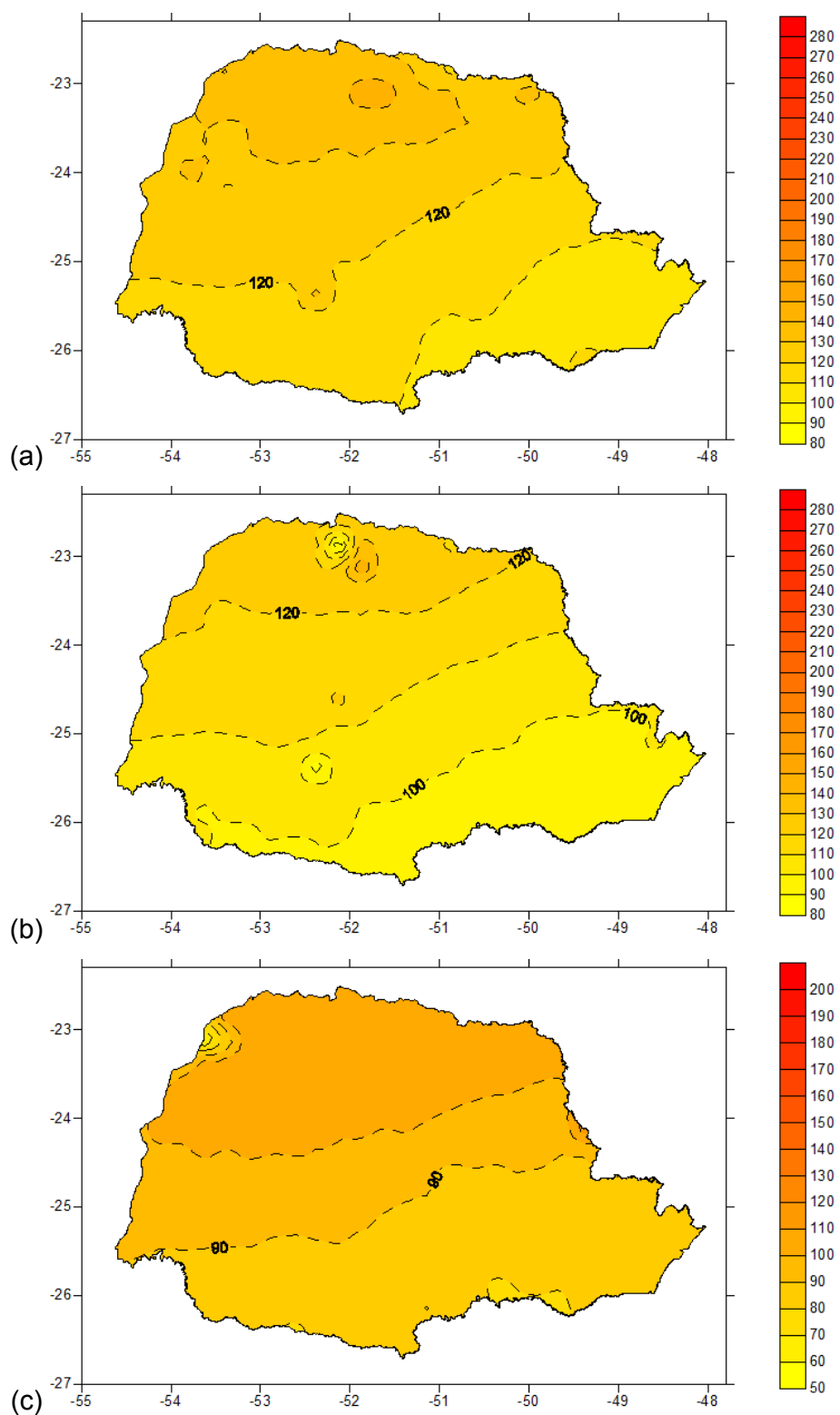


FIGURA 4.14 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 14º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

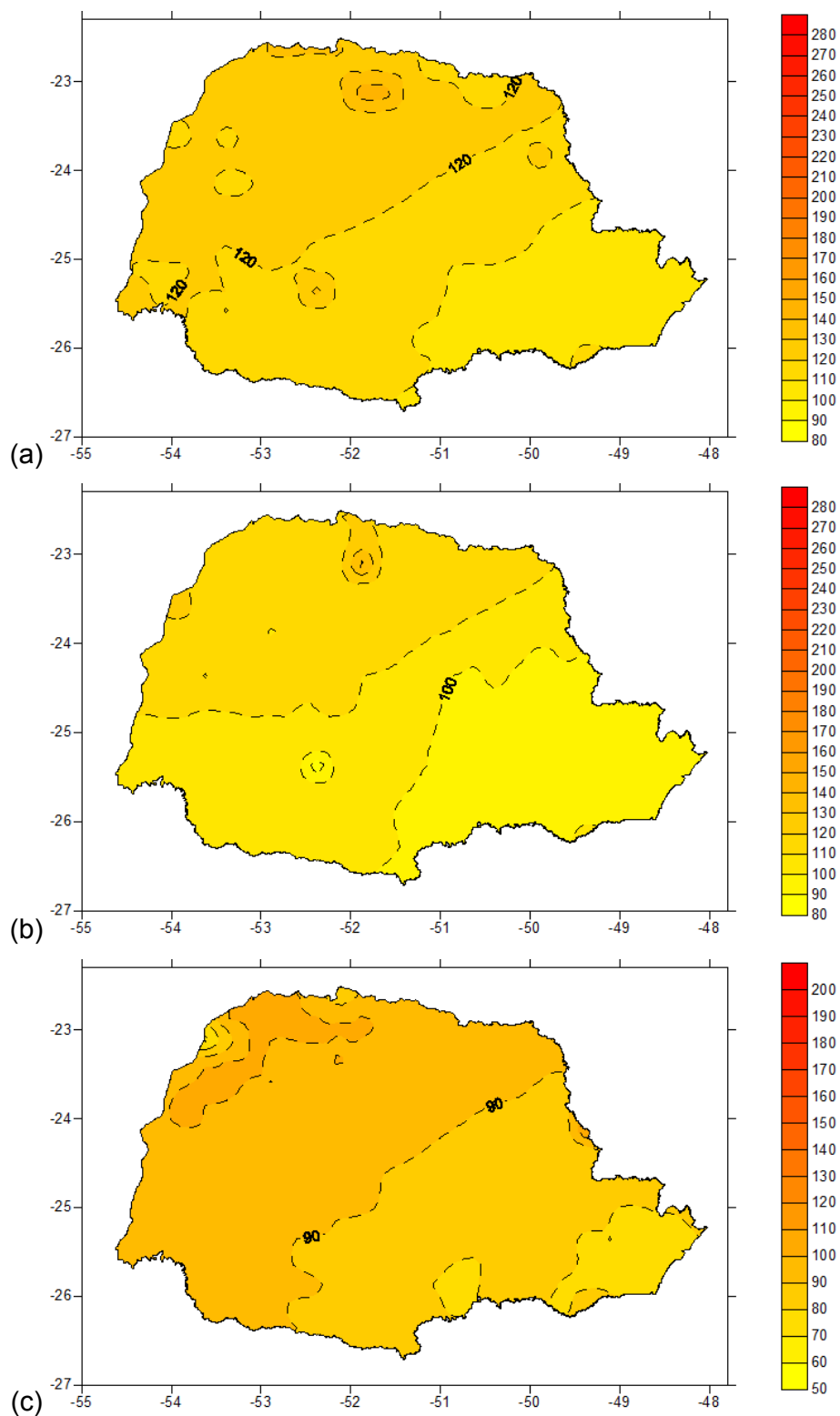


FIGURA 4.15 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{dec}^{-1}$) para o 15º decênio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

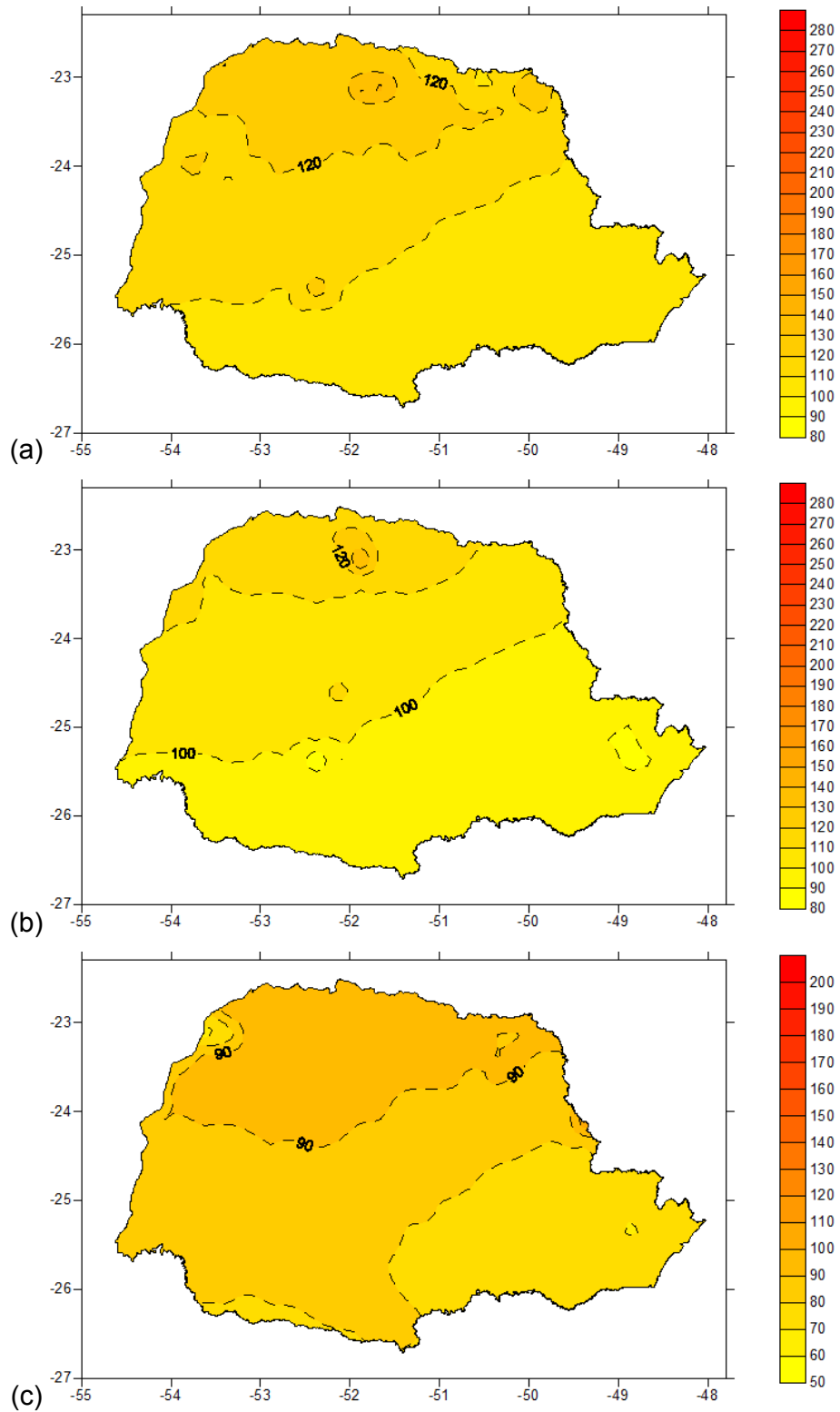


FIGURA 4.16 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 16º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

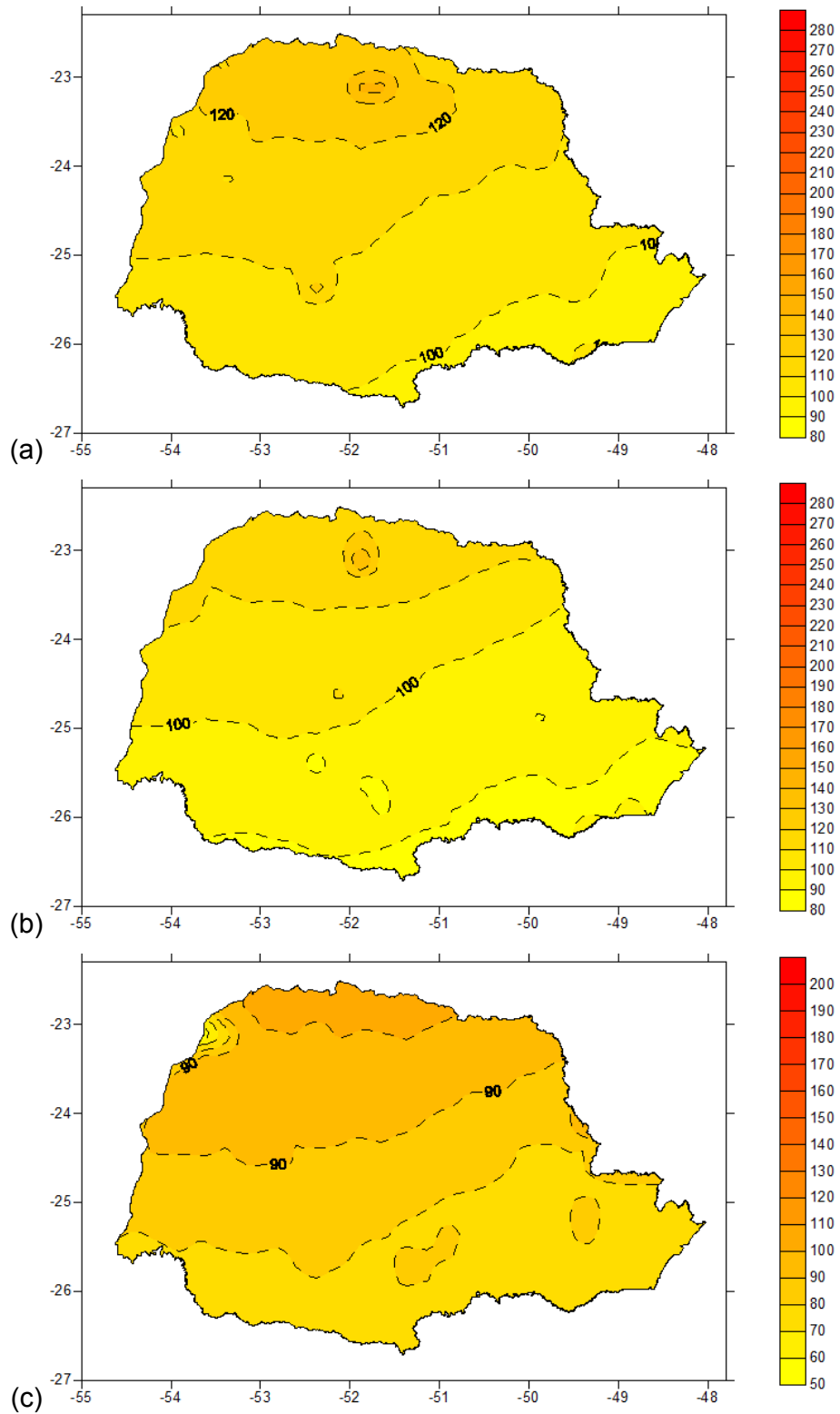


FIGURA 4.17 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 17º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

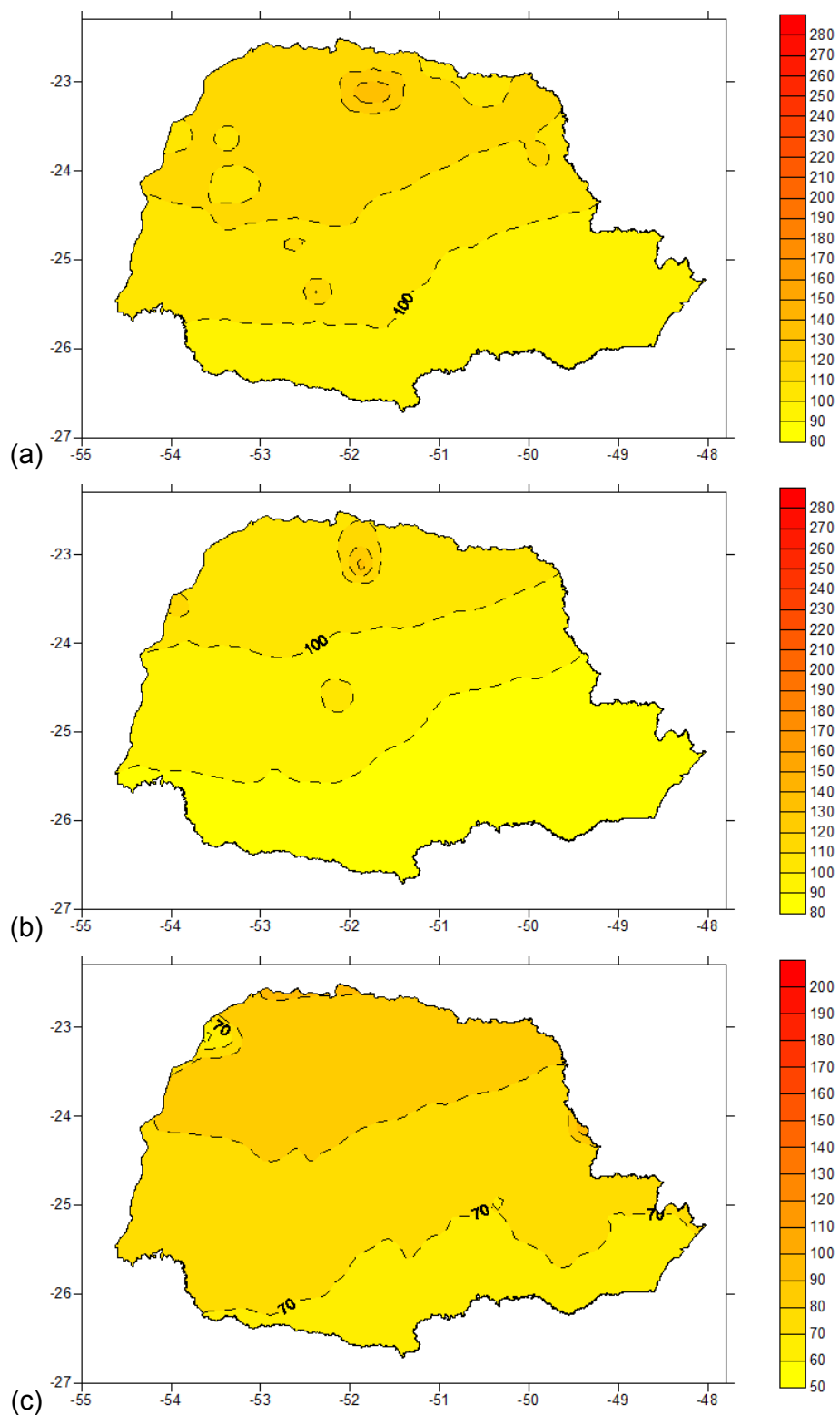


FIGURA 4.18 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 18º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

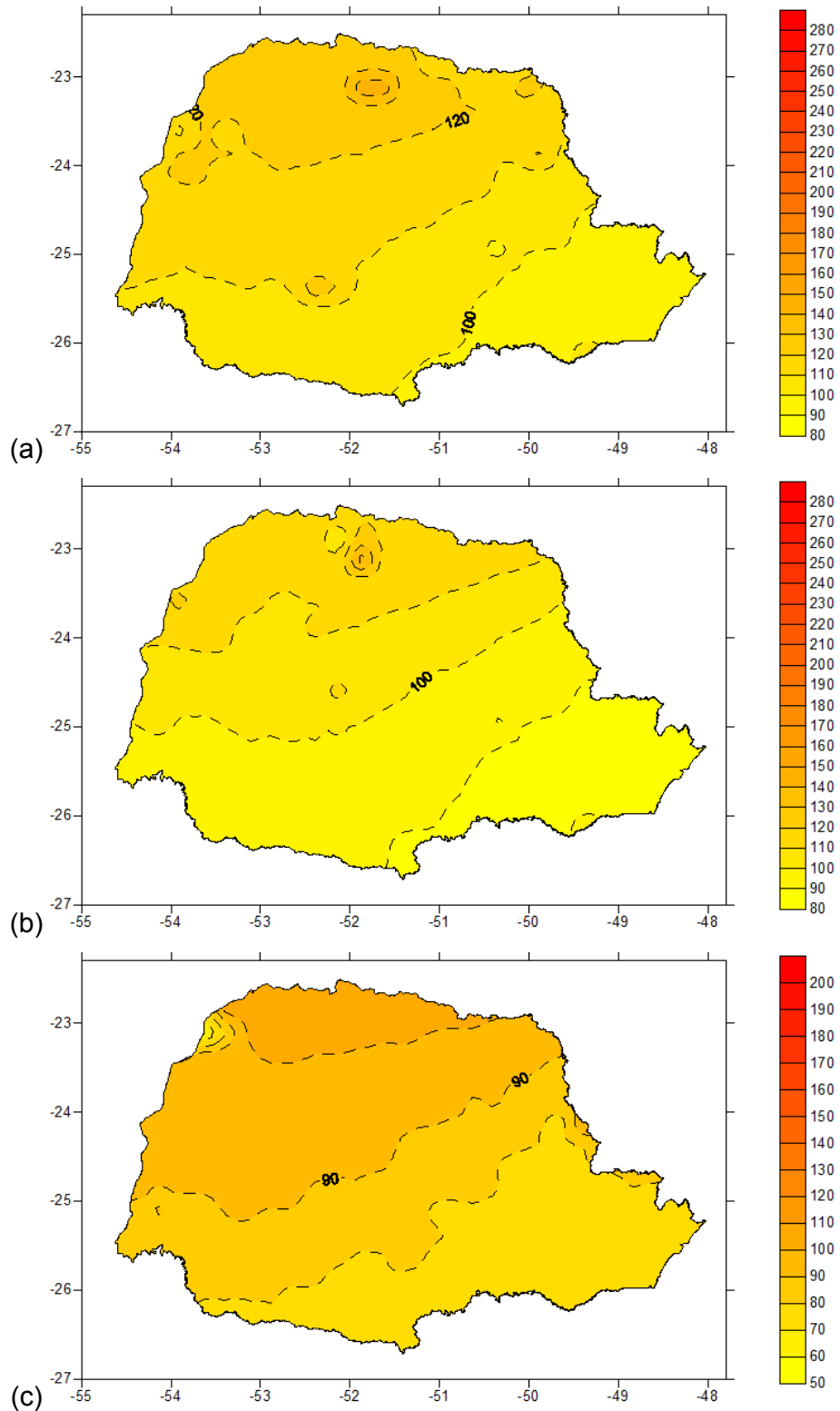


FIGURA 4.19 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 19º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

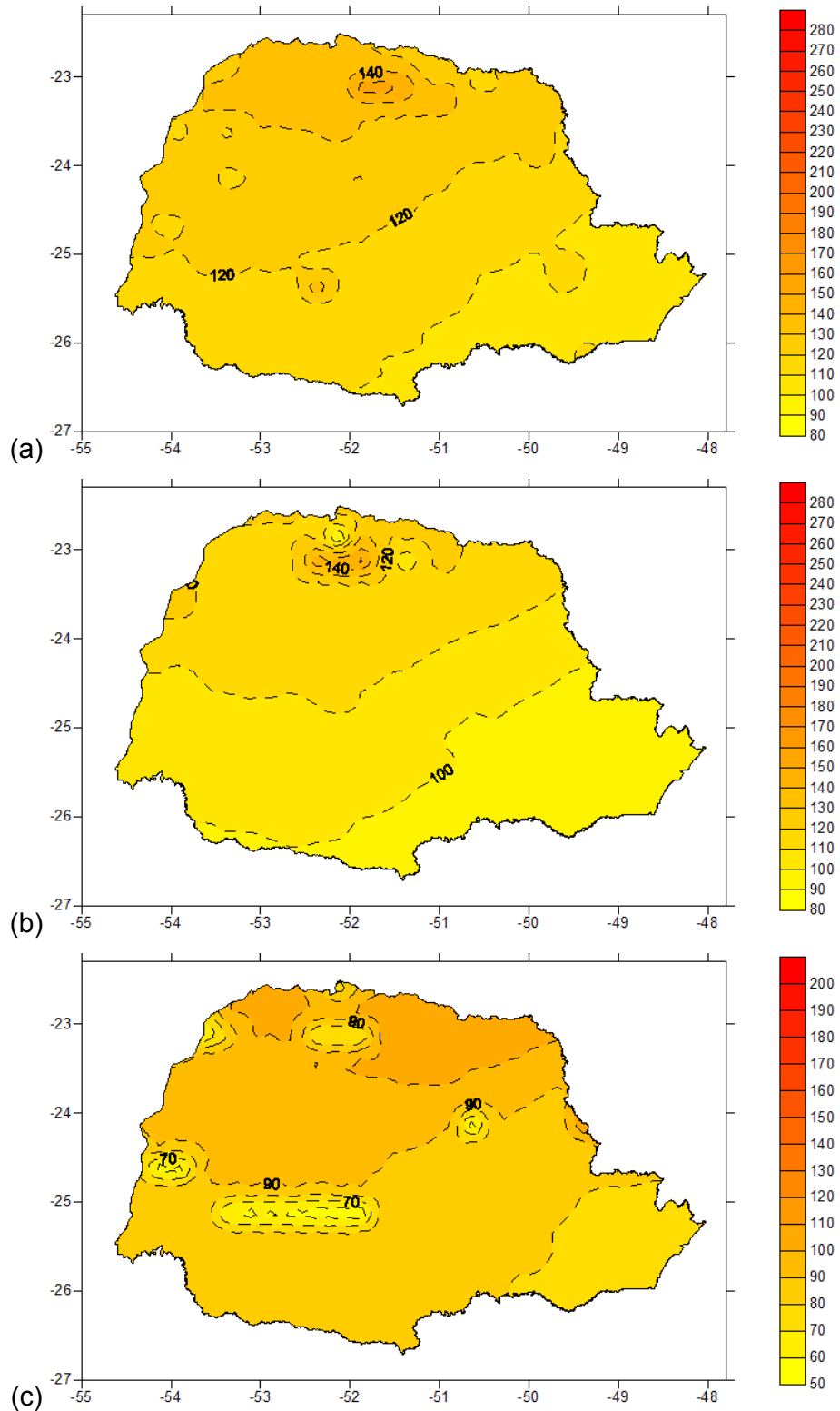


FIGURA 4.20 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 20º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

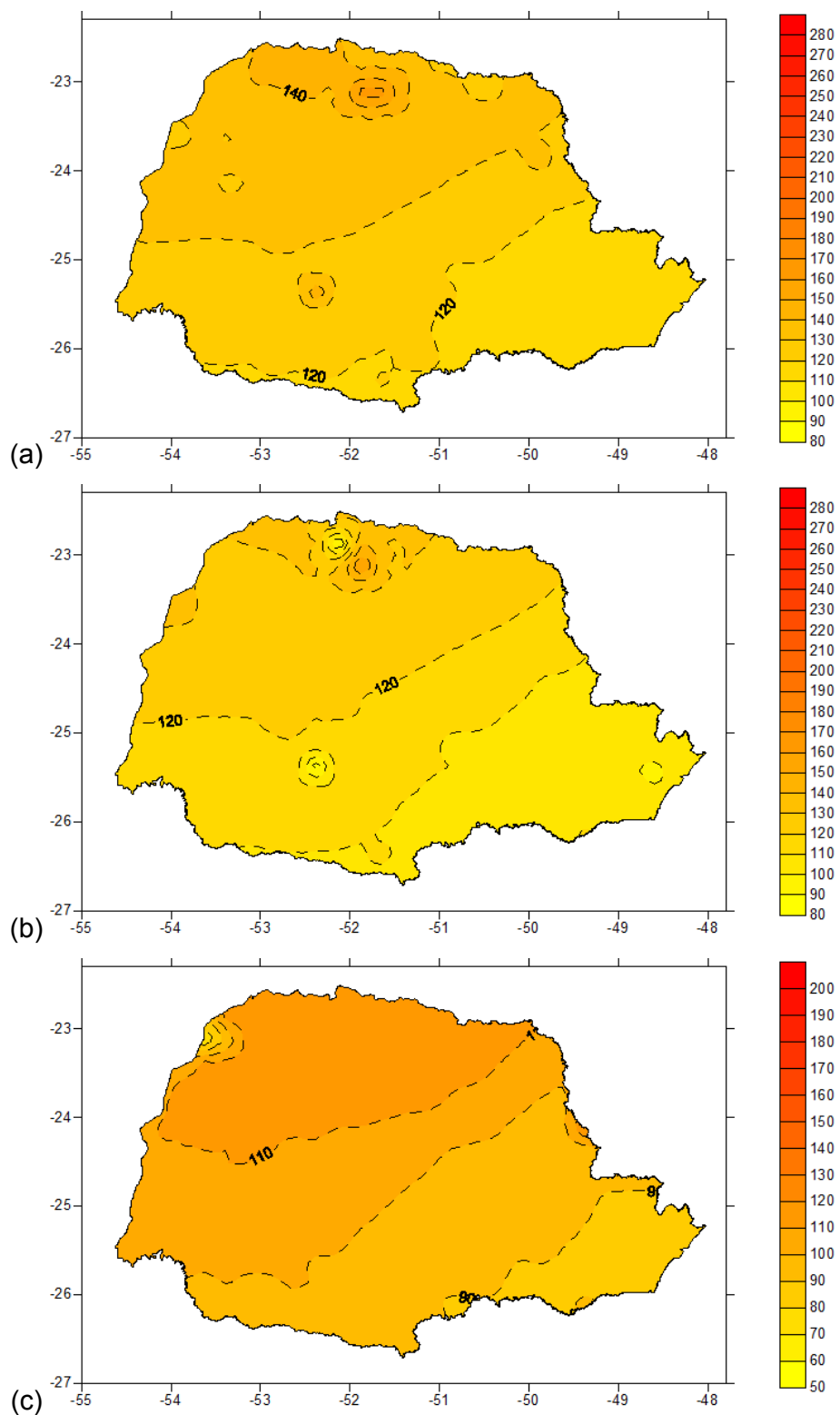


FIGURA 4.21 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 21º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

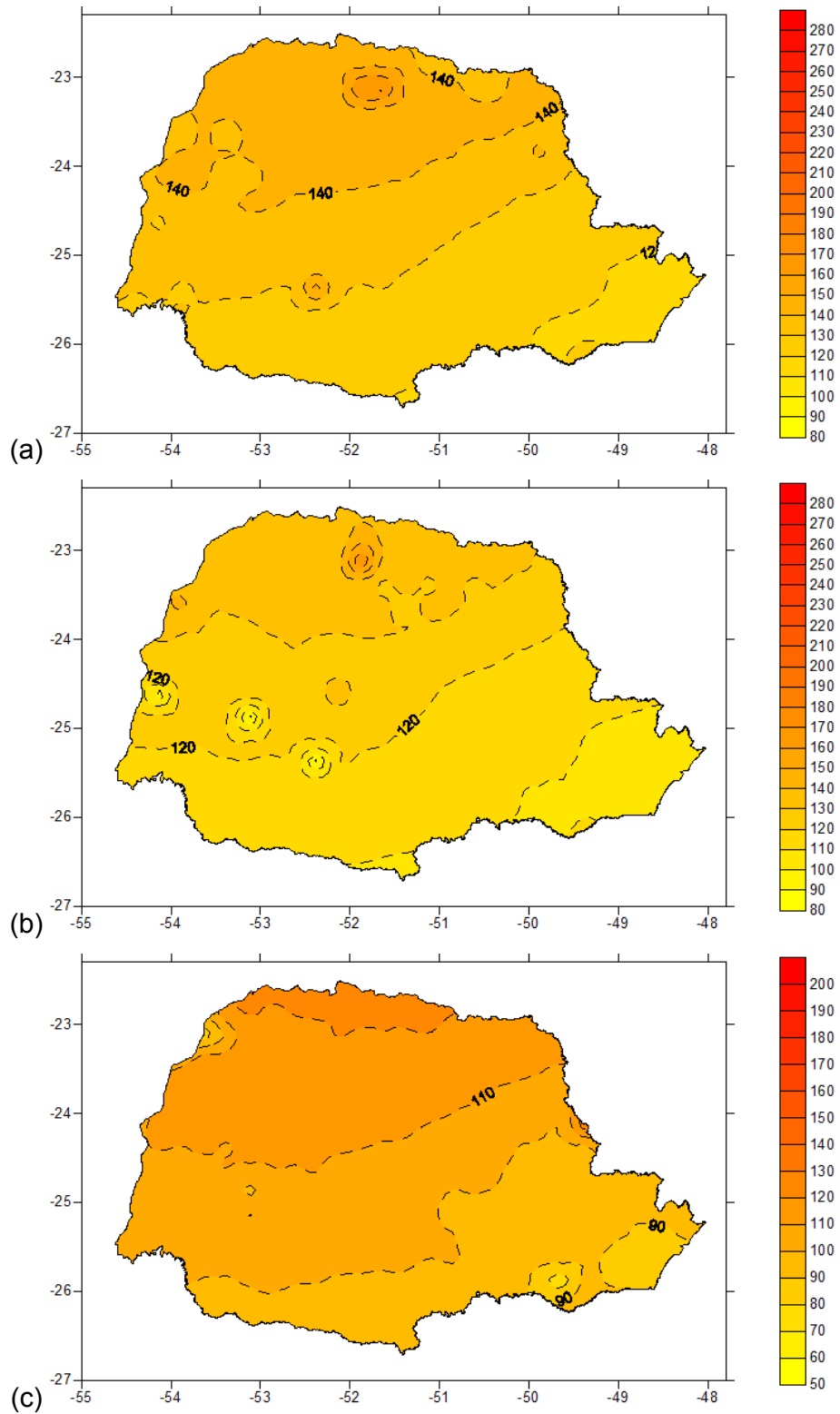


FIGURA 4.22 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 22º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

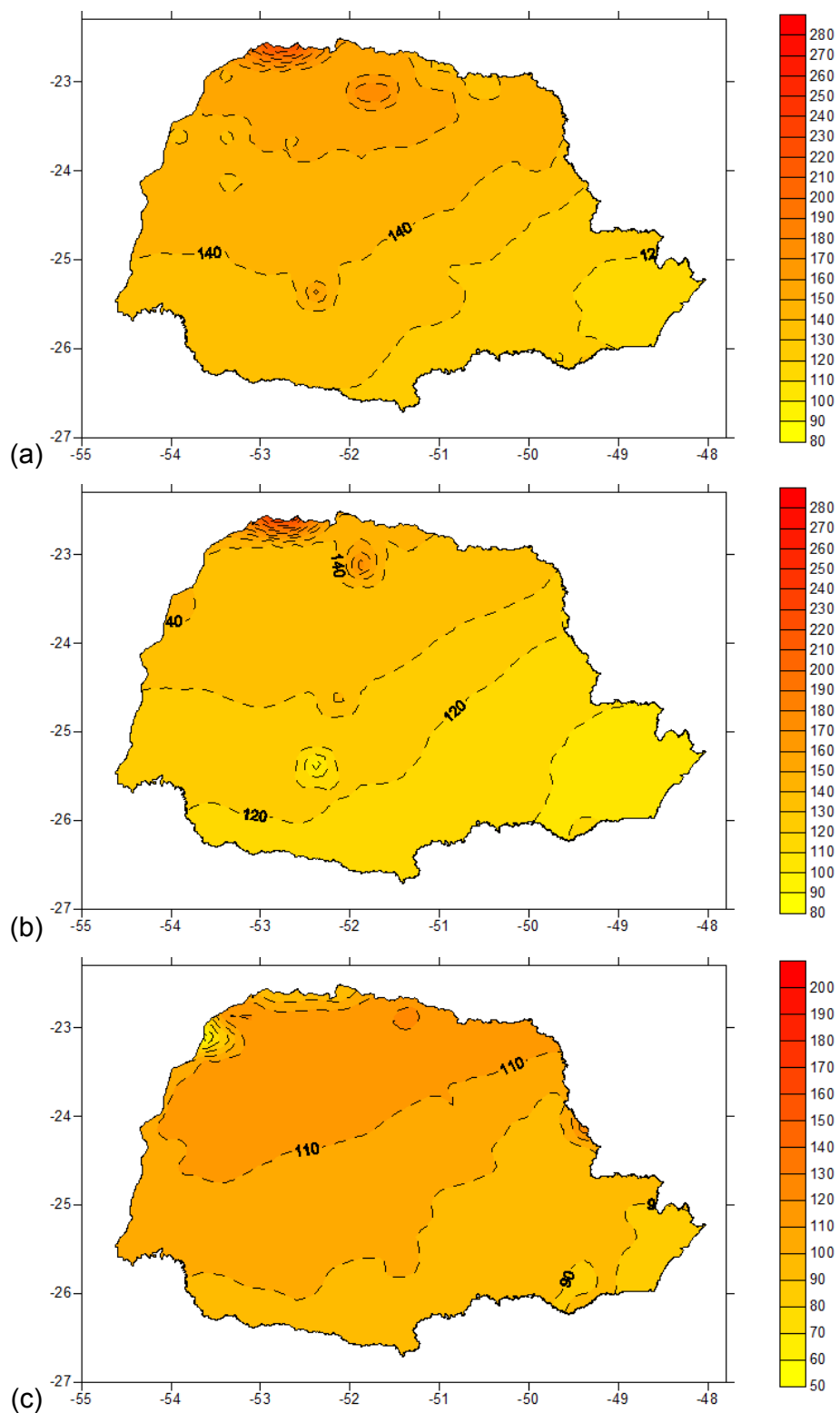


FIGURA 4.23 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 23º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

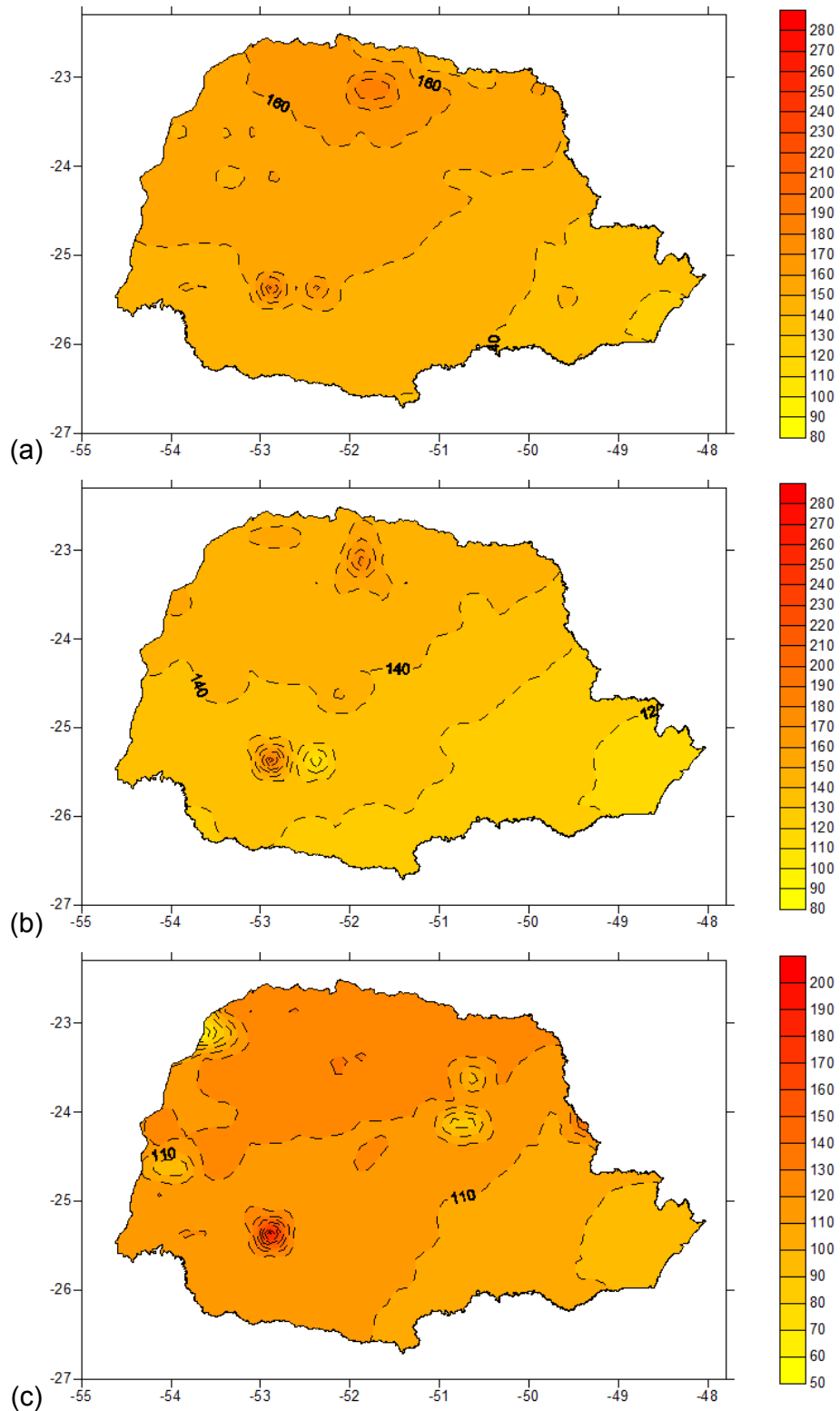


FIGURA 4.24 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 24º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

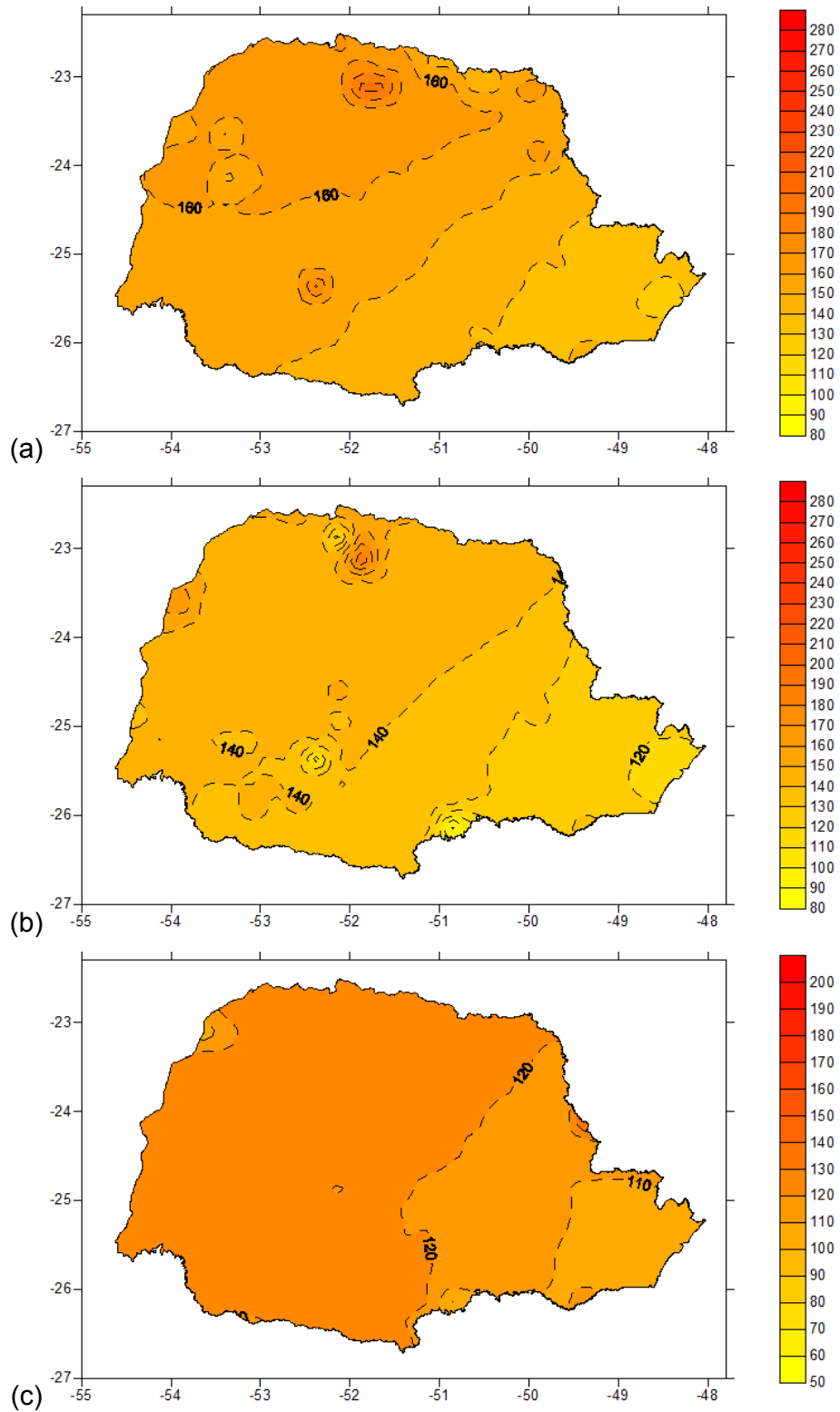


FIGURA 4.25 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 25º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

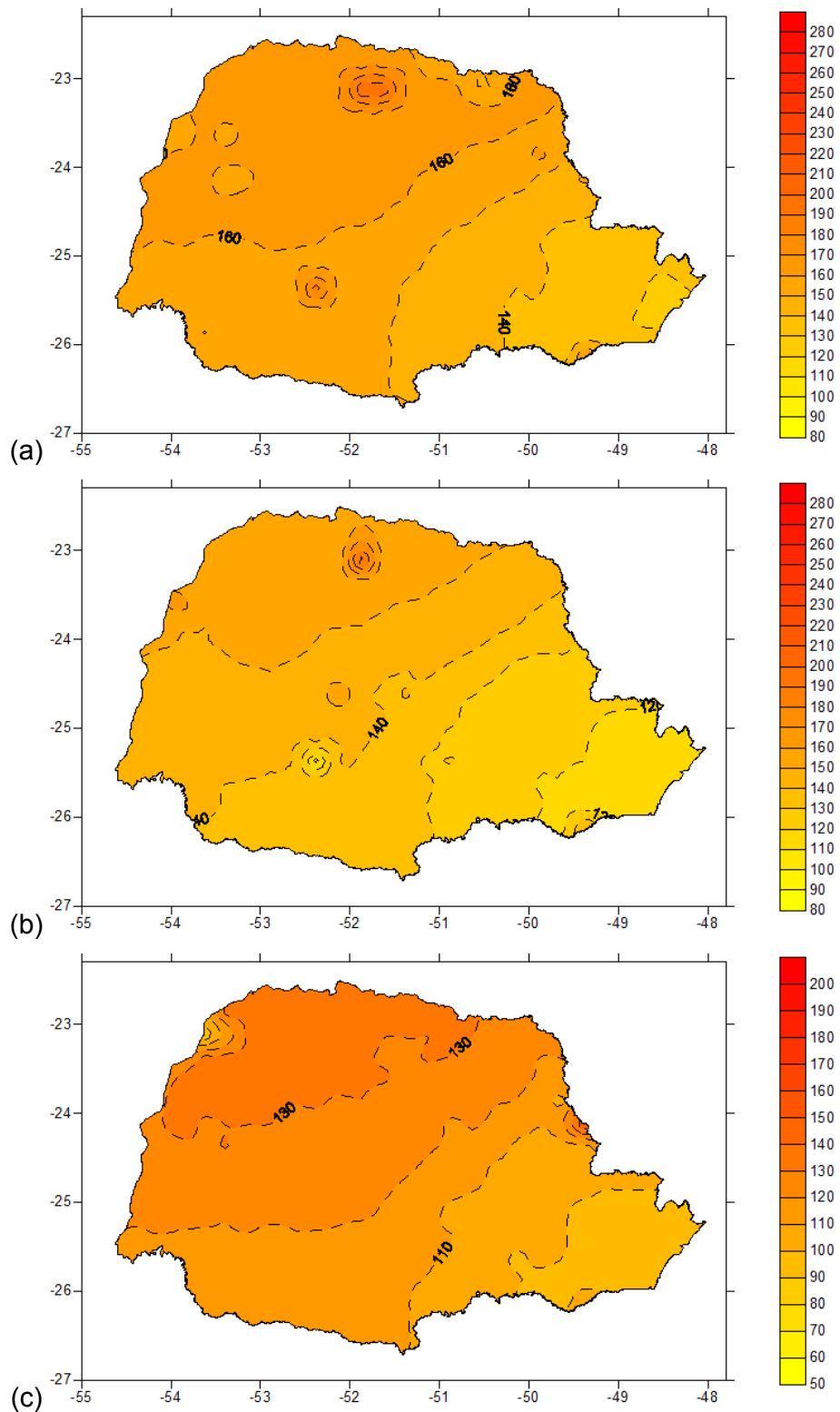


FIGURA 4.26 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 26° decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

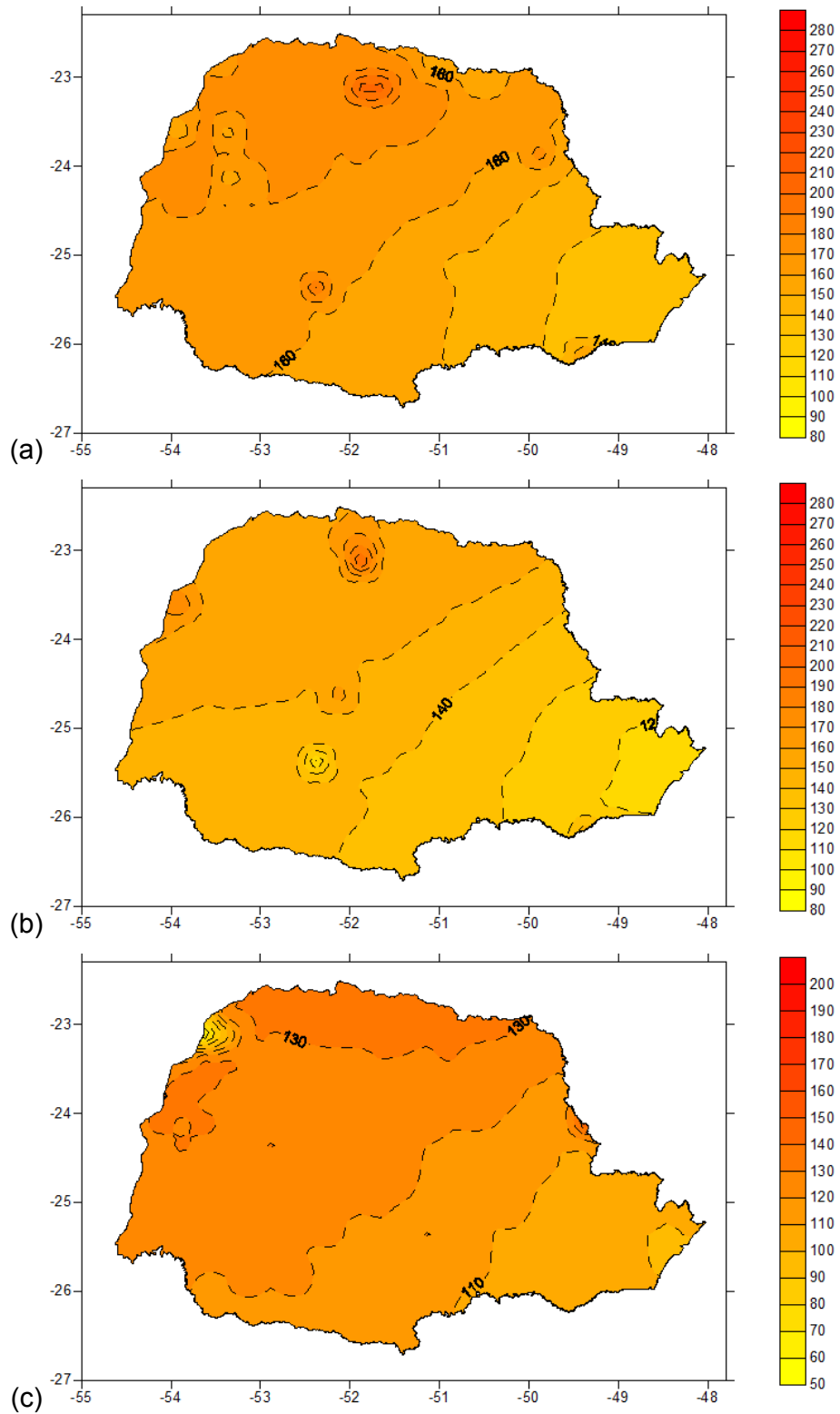


FIGURA 4.27 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 27º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

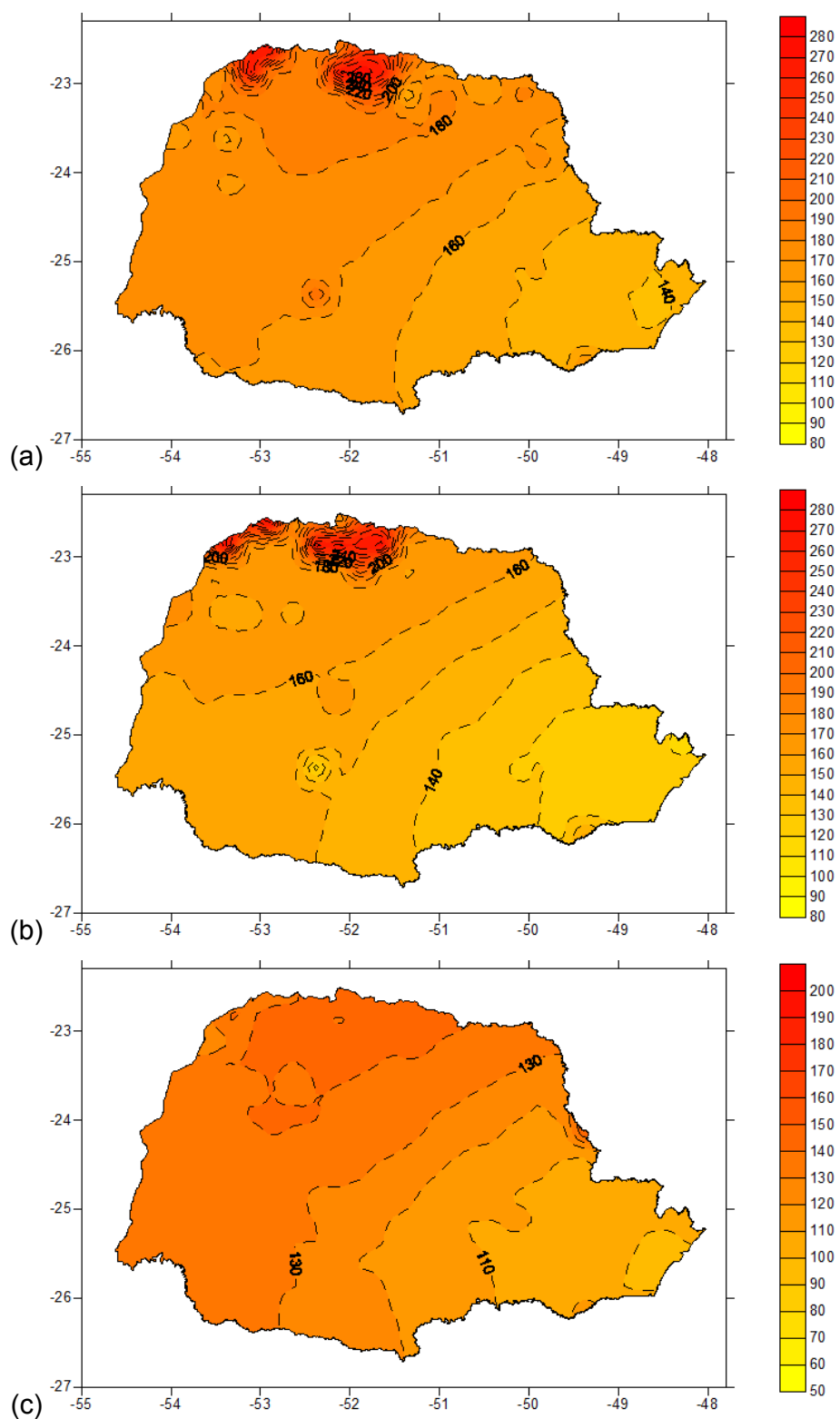


FIGURA 4.28 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 28º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

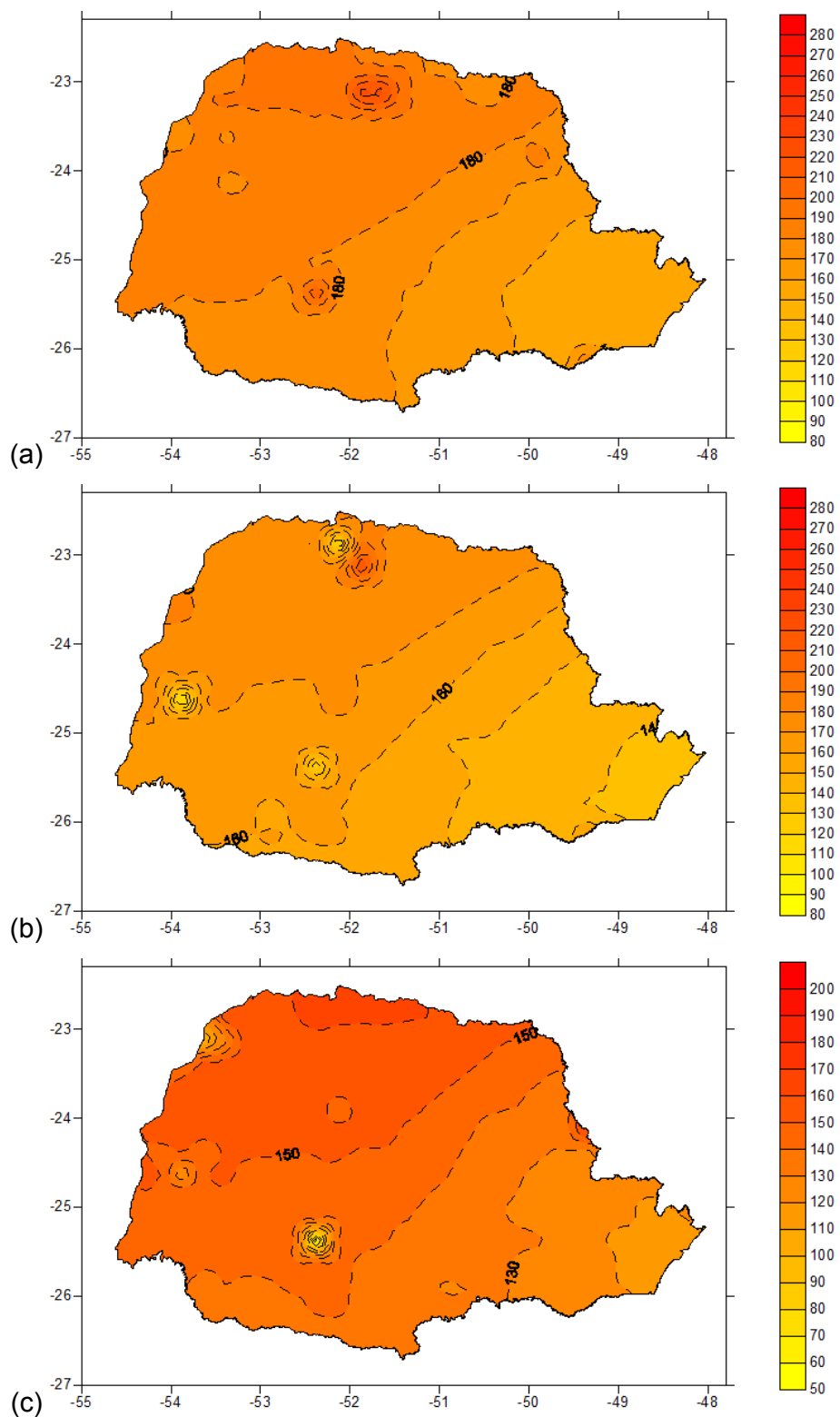


FIGURA 4.29 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 29º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

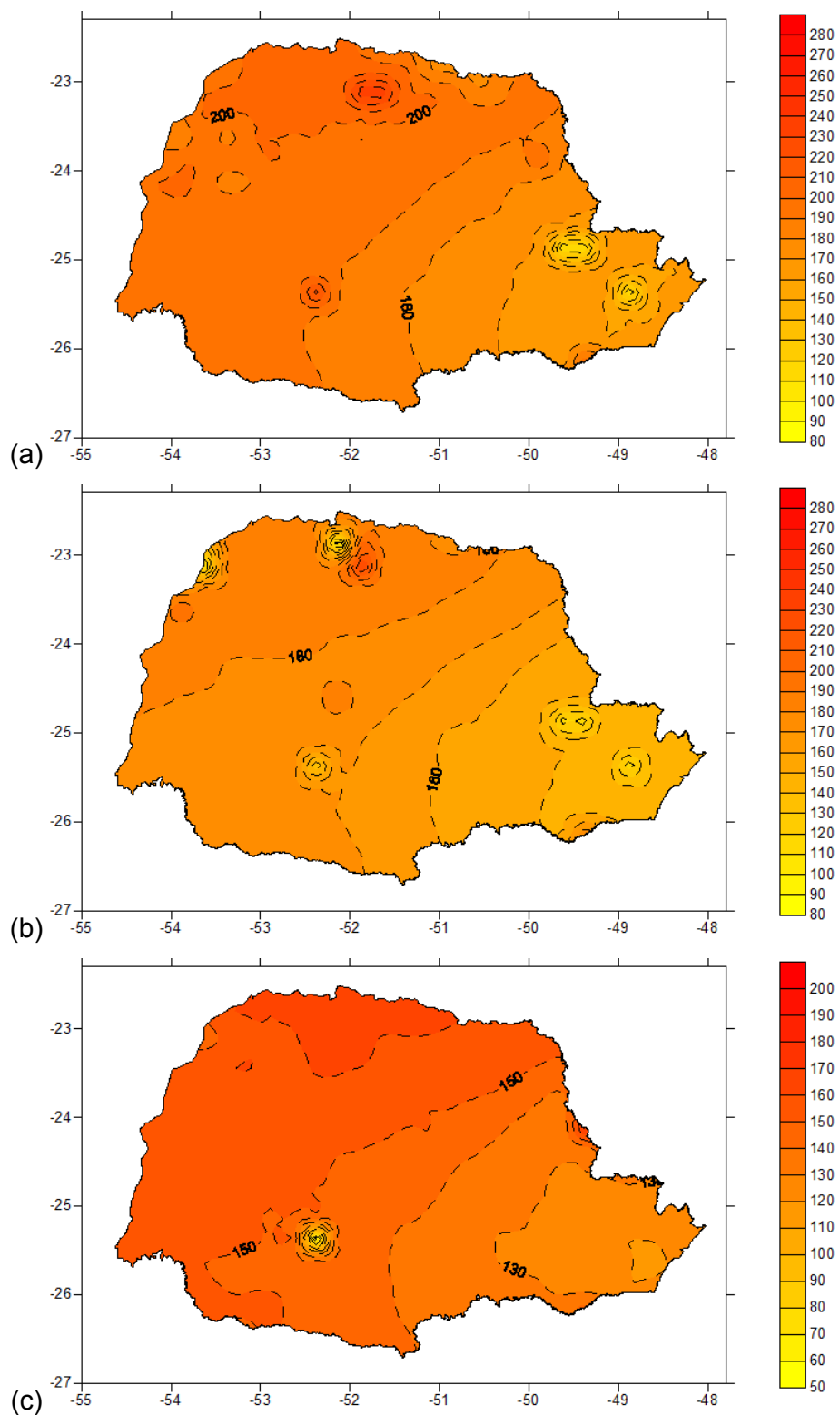


FIGURA 4.30 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 30º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

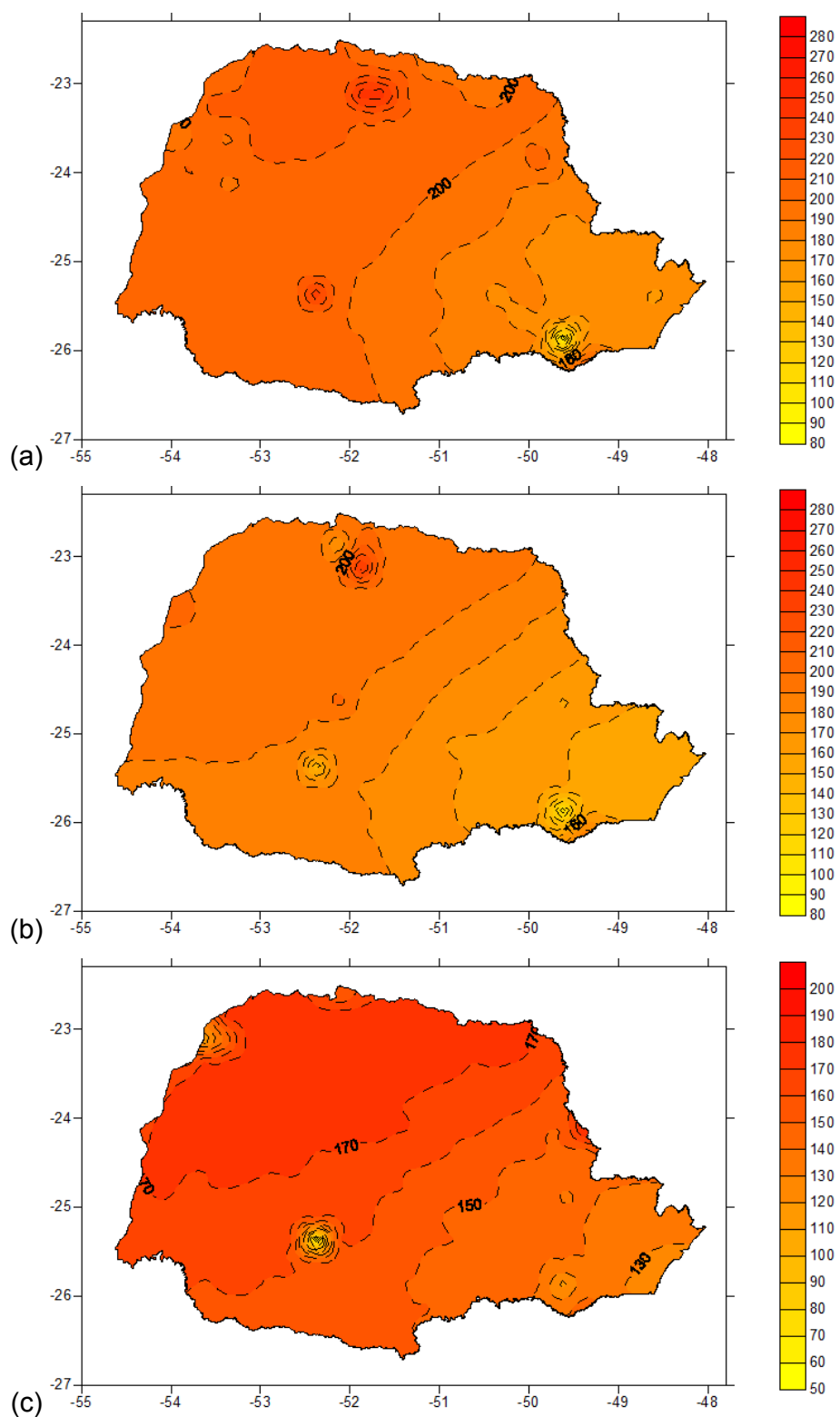


FIGURA 4.31 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 31º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

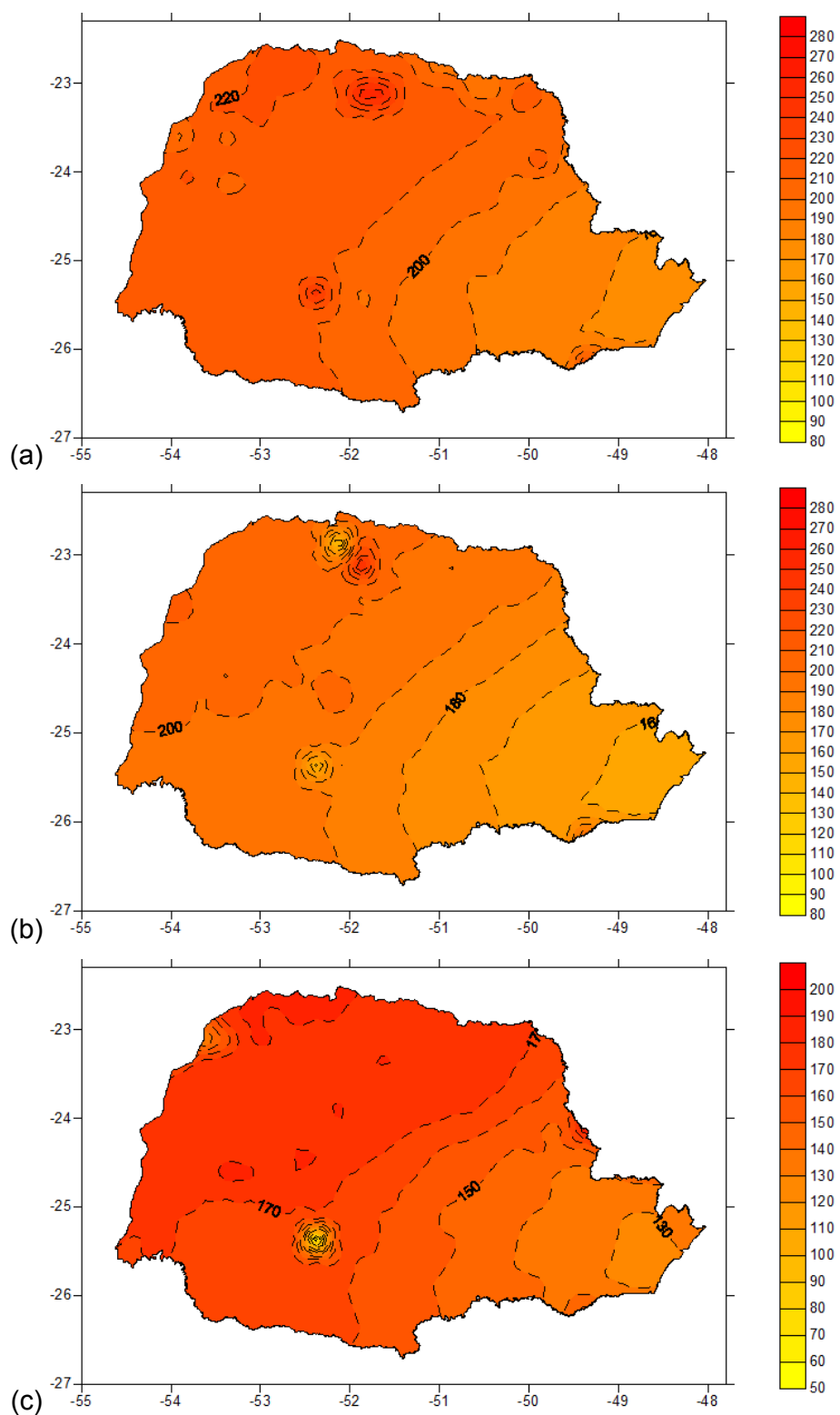


FIGURA 4.32 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 32º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

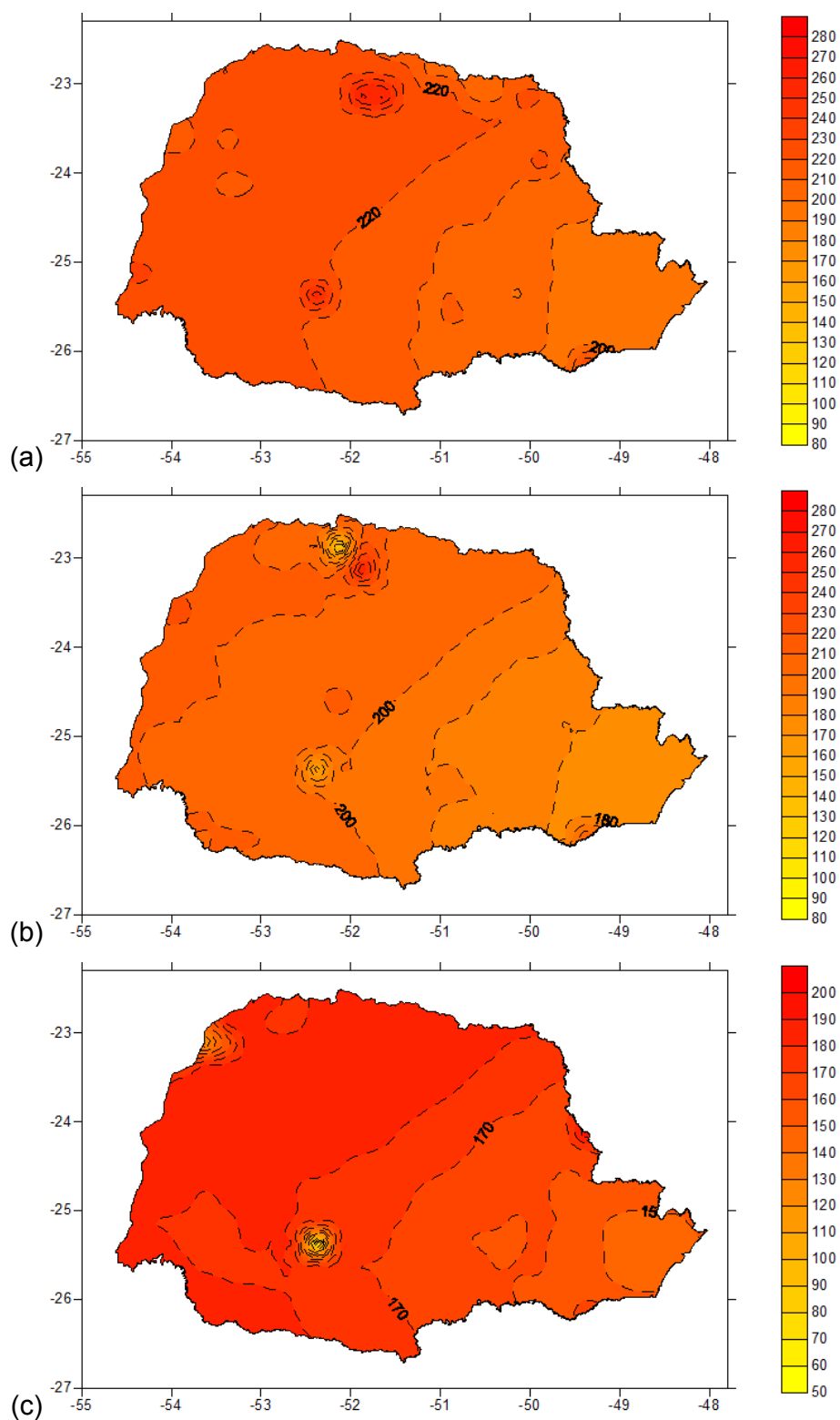


FIGURA 4.33 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 33º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

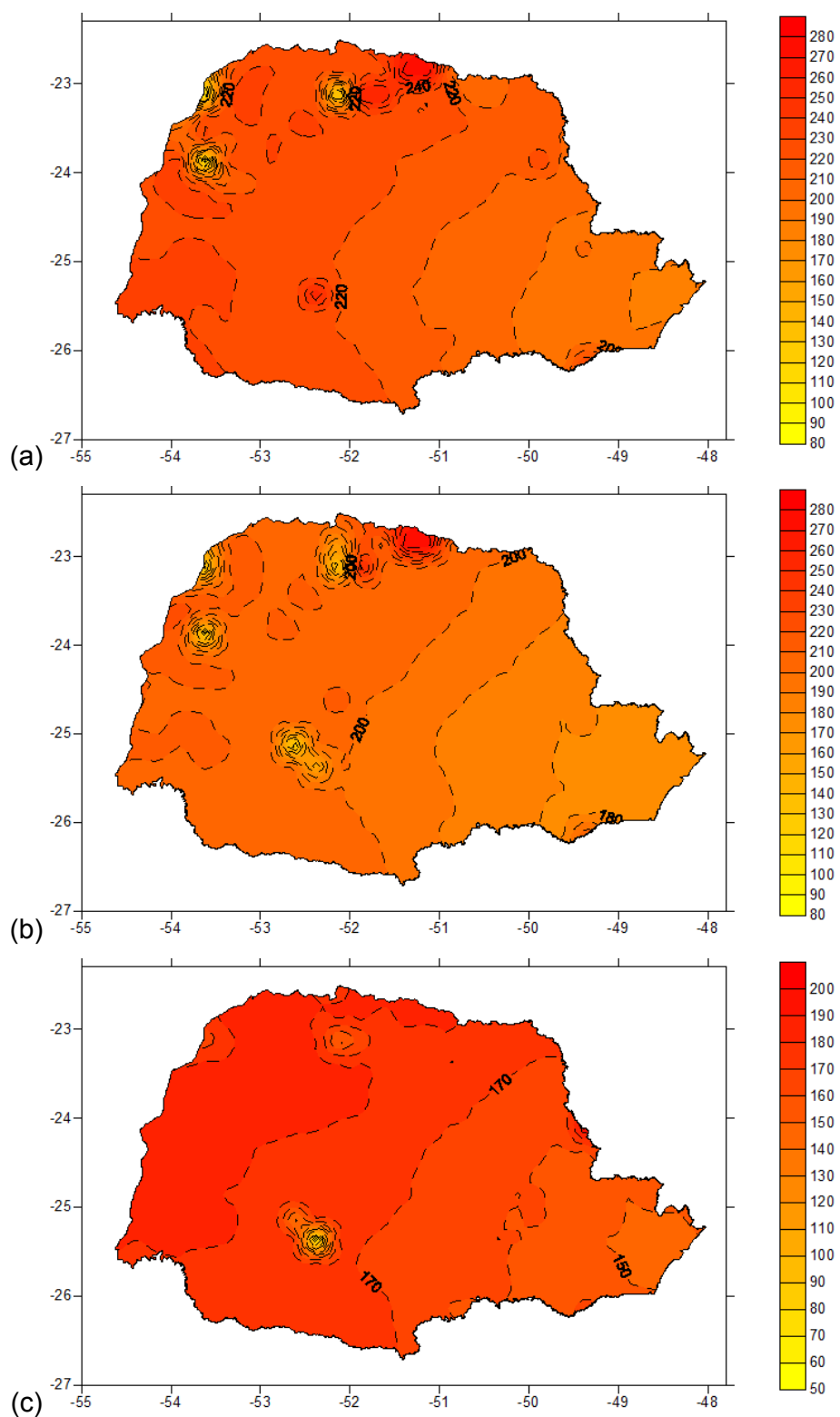


FIGURA 4.34 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 34º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

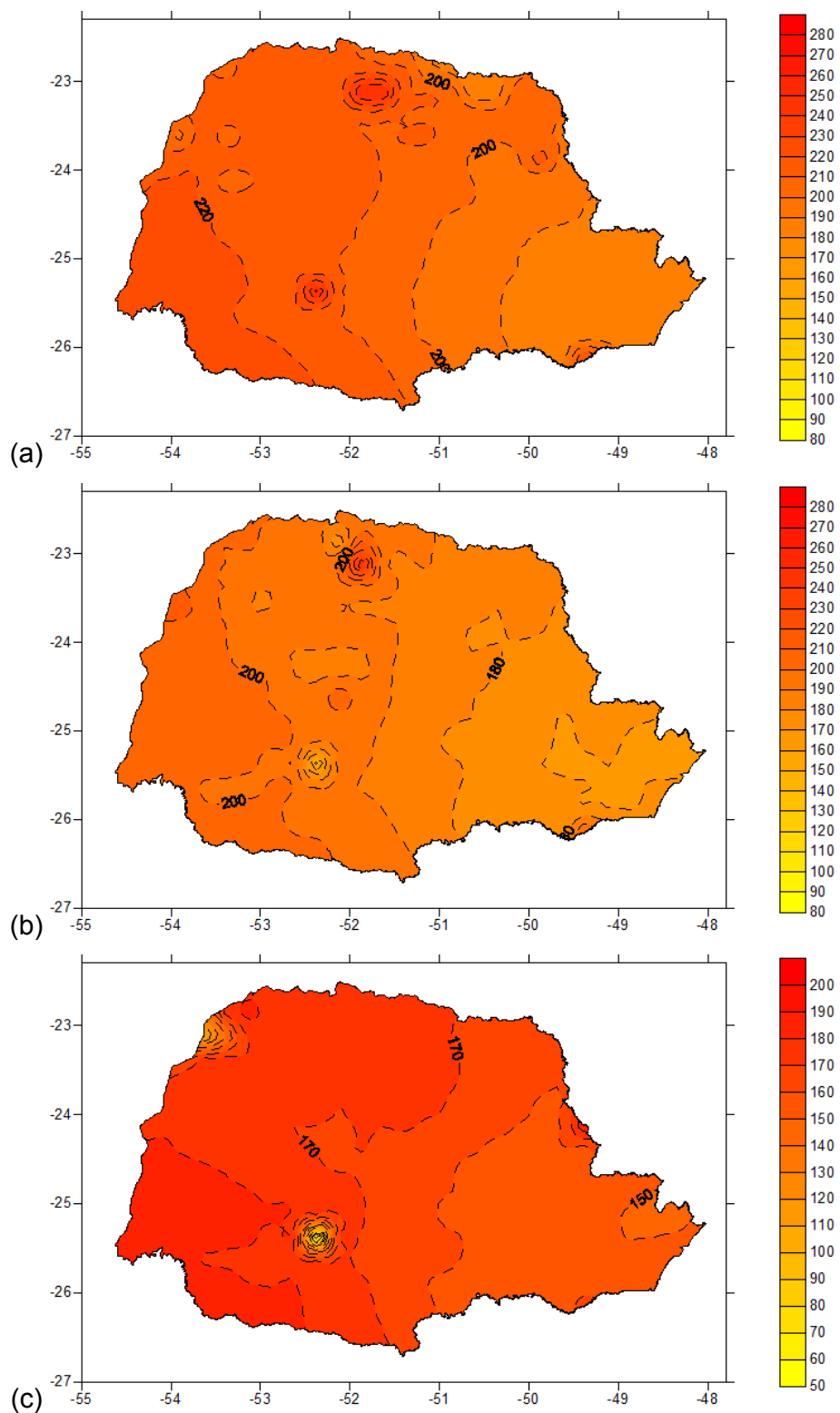


FIGURA 4.35 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 35º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

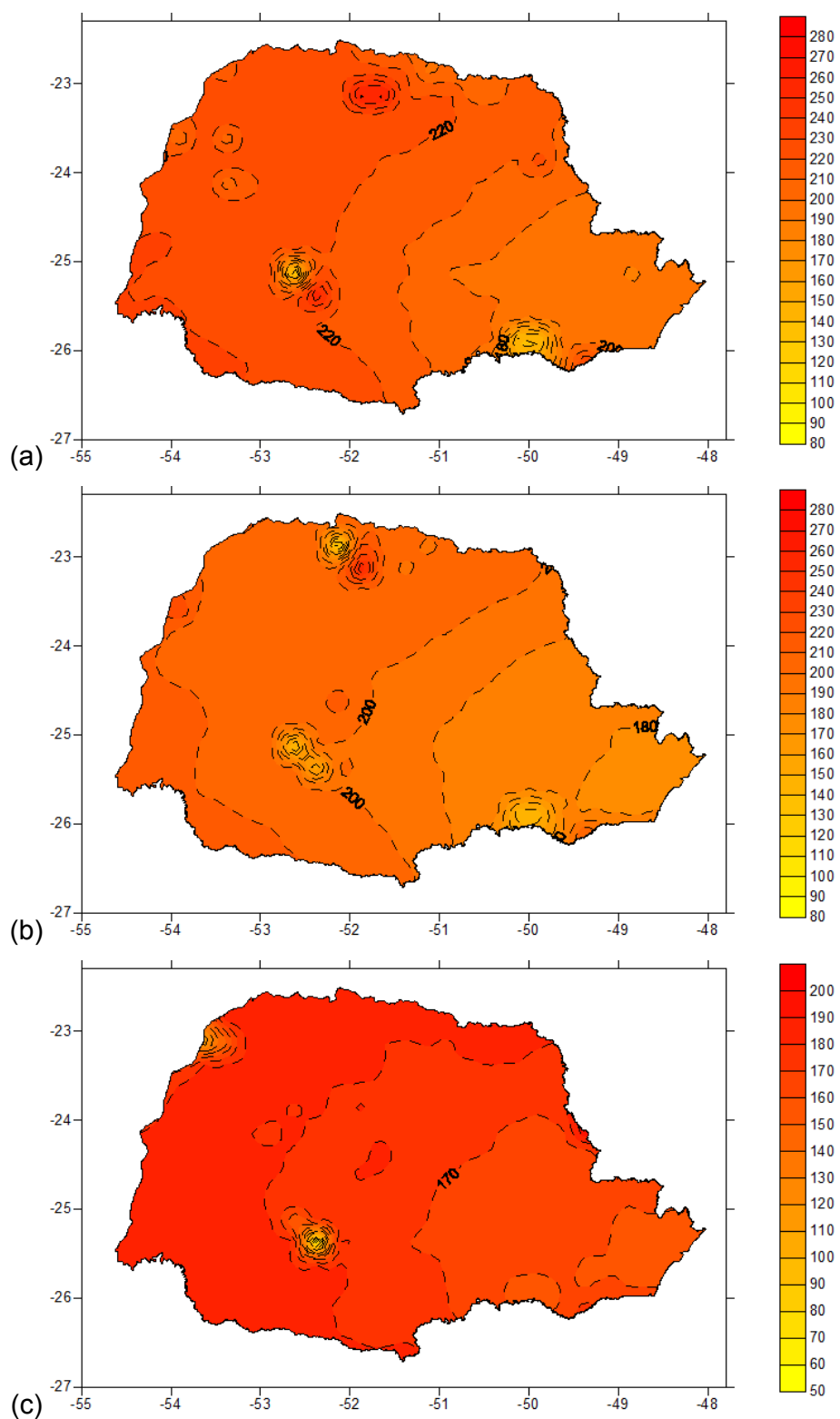


FIGURA 4.36 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 36º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

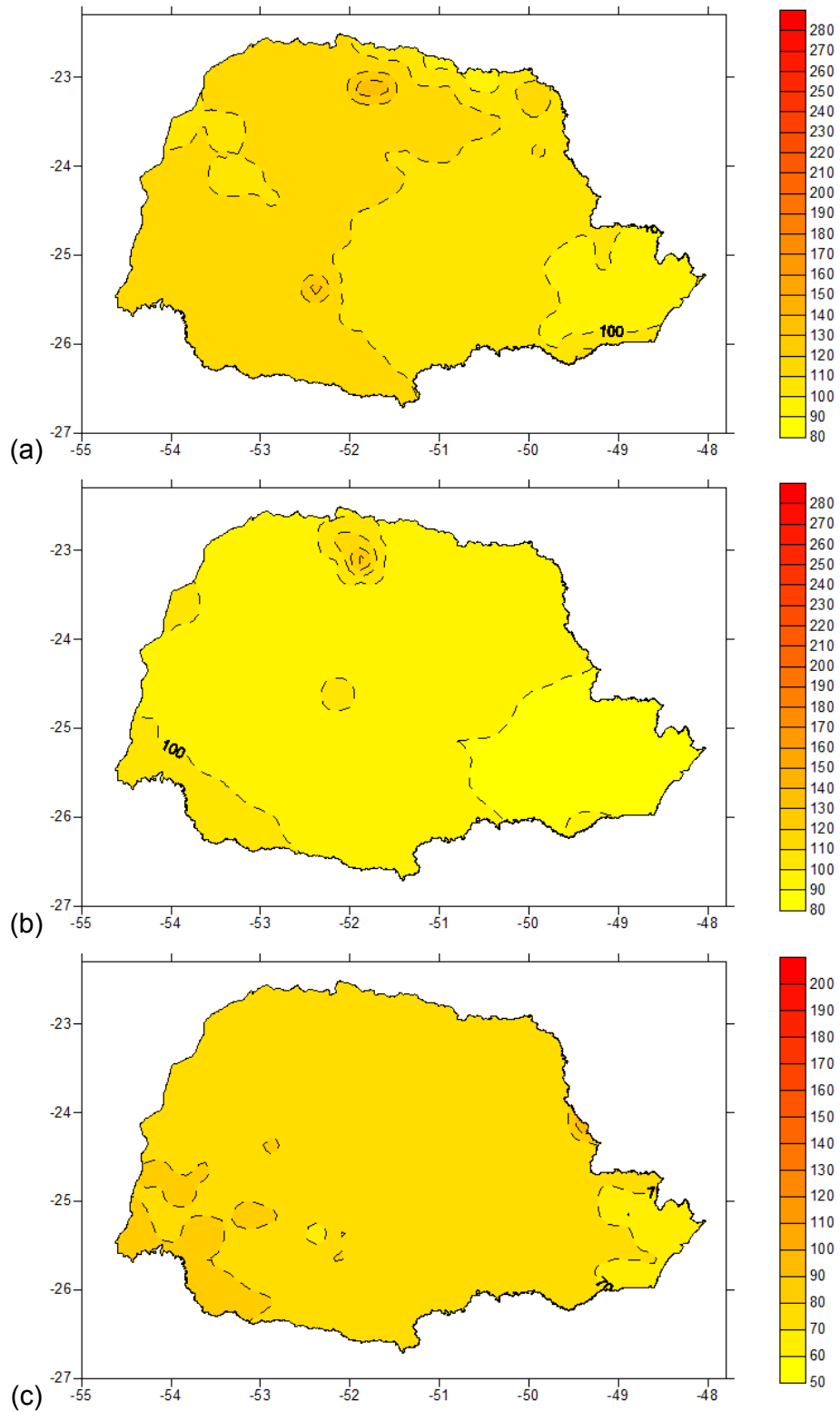


FIGURA 4.37 – Radiação solar incidente (R_s ; em $\text{MJ m}^{-2} \text{decêndio}^{-1}$) para o 37º decêndio no Estado do Paraná, calculados para a probabilidade de: a) 50%; b) 75%; e, c) 95%.

5 CONCLUSÕES

- As funções densidade de probabilidade (*fdp's*) normal e gama foram as que melhor se ajustaram aos valores decendiais de *Rs*, totalizando 86,3% das *fdp's*.
- Os valor anual médio provável decendial da *Rs* foi de 163,51 MJ m⁻² decêndio⁻¹ para 50%, 148,45 MJ m⁻² decêndio⁻¹ para 75% e 126,84 MJ m⁻² decêndio⁻¹ para 95%.
- Os tipos climáticos e as altitudes regionais influenciam os valores prováveis da *Rs*, mas não podem ser o único parâmetro de referência.
- A *Rs* foi maior na região do Terceiro Planalto e menor na Região do Litoral do Estado do Paraná. Nos três níveis de probabilidades testados as variações da *Rs* são maiores nas regiões litorâneas e menores nas regiões oeste do Estado, tendo aumento da *Rs* na direção leste para oeste, com maiores valores verificados no período estacional verão.

6 REFERÊNCIAS

ABRAHA, M. G.; SAVAGE, M. J. Comparison of estimates of daily solar radiation from air temperature range for application in crop simulations. **Agricultural and Forestry Meteorology**, v. 148, p. 401-416, 2008.

ALMOROX, J; HONTORIA C. Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. **Energy Conversion and Management**, v. 45, p. 1529–1535, 2004.

ALVARES, C.A.; STAPE J. L.; SENTELHAS P. J.; GONÇALVES J. L. M.; SPAROVEK G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.2 p.711-728 2013.

BARATTO, R. L. Coeficiente de proporcionalidade K_{rs} da equação de Hargreaves e Samani para o Brasil. Curitiba, 2016. 72p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso - Agronomia) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

BORGES, V. P.; OLIVEIRA, A. S.; COELHO FILHO, M. A.; SILVA, T. S. M.; PAMPONET, B. M. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 74-80, 2010.

CARGNELUTTI FILHO, A.; MATZENAUER, R.; TRINDADE, J. K. Ajustes de funções de distribuição de probabilidade à radiação solar global no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 12, p. 1157-1166, 2004 .

CHANG, J. **Climate and Agriculture: an ecological survey**. Aldine. Chicago, 1968.

DORNELAS, K. D. S. et al. Coeficientes médios da equação de Angström-Prescott, radiação solar e evapotranspiração de referência em Brasília. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 1213-1219, 2006.

ERTAL, M. Estimativa do coeficiente de proporcionalidade K_{RS} da equação de Hargreaves e Samani para o Estado do Paraná (Trabalho de Conclusão de Curso). Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Curso de Agronomia, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, 2015.

FRIZZONE, J. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SOUZA, J. L. M.; ZOCOLER, J. L. **Planejamento de irrigação: análise de decisão de investimento**. Embrapa Informação Tecnológica e Embrapa Meio Norte, 2005. 627p.

GALLEGOS, H. G.; LOPARDO, R. Spatial variability of the global solar radiation obtained by the Solarimetric Network in the Argentine Pampa Humeda, **Solar Energy**, v. 40, n. 5, p. 397-404, 1988.

HENA, A.; ALI, S.; RAHMAN, M. A simple statistical model estimate incidente solar radiation at the surface from NOAA-AVHRR satellite data. **International**

Journal of Information Technology and Computer Science, v. 2, p. 36-41, 2013.

HUNT, L. A., KUCHAR, L.; SWANTON, C. J. Estimation of solar radiation for use in crop modeling. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 91, n. 3-4, p. 293-300, 1998.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais climatológicos**. 2007. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/html/clima.php/S>.

ITCG – Instituto de Terras Cartografias e Geociências. Mapa de clima do Estado do Paraná. Curitiba: ITCG, 2006.

KRATZENBERG, M. G.; COLLE, P. S.; BUENO, E.; NETO, M.; LUIZ, S., BEYER, H. G.; ABREU, S. L. Rastreabilidade de Radiômetros para Medição da Energia Solar no Brasil. In: METROLOGIA 2003 - Metrologia para a Vida, 2003, Recife. Anais Congresso Brasileiro de Meteorologia - 2003, 2003.

LIMA, E. P. Evapotranspiração de referência de PenmanMonteith, padrão FAO (1998), a partir de dados de temperaturas máxima e mínima de Minas Gerais. 2005. 67f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Curso de Pós-graduação em Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, MG.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; SILVA, S. A. B.; ABREU, S. L.; COLLE, S. Solar energy scenarios in Brazil, Part one: resource assesment. **Energy Policy**, v.38, p.2853-2864, 2008.

SANTOS J. B, et al., Captação e aproveitamento da radiação solar pelas culturas da soja e do feijão e por plantas daninhas. **Bragantia**, v. 62, n. 1, p. 147-153, 2003

OZGOREN, M; BILGILI, M; SAHIN, B. **Estimation of global solar radiation using ANN over Turkey**. Expert Systems with Applications. 2011.

PEREIRA, A. B.; VRISMAN, A. L.; GALVANI, E. Estimativa da radiação solar global diária em função do potencial de energia solar na superfície do solo. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 2, p. 211-216, 2002.

PEREIRA E.B.; MARTINS F.R.; ABREU, S.L.; RÜTHER R. **Atlas brasileiro de energia solar** São José dos Campos, INPE, p. 60, 2006.

SOUZA, J. L. M. **Ciclo da água na agricultura: Fundamentos para o estudo do sistema solo-planta-atmosfera**. UFPR/SCA/DSEA/LAMOSIA. 2016.

SOUZA, J. L. M.; JERSZURKI, D; DAMAZIO, Emanuely C. Relações funcionais entre precipitação provável e média em regiões e climas brasileiros. **Pesq. agropec. bras**, Brasília, v. 48, n. 7, p. 693-702, 2013

SOUZA, J. L. M. **Estimativa do coeficiente de proporcionalidade Krs da equação de HARGREAVES E SAMANI (1982)**. Versão 1.0. Curitiba: DSEA/SCA/UFPR, 2015 (Planilha computacional).

THORNTON, P. E.; RUNNING, S. W. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation. **Agricultural and Forestry Meteorology**. p. 211–28, 1999.

TREWARTHA, G. T. **An Introduction to Climate**. 4 ed. EUA: McGraw-Hill, p.408, 1968

TOLEDO, D.; SOUZA, J. L. M.; MIGNOT, L. Desenvolvimento de rotinas de programação na linguagem Visual Basic Application para correção e análise de dados. **In: XX EVENTO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFPR (2012, Curitiba)**. Livro de Resumos. Curitiba: UFPR, 2012.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; Scanlon, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644-2659, 2015.