

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

DANIELA DANIGNO KONRADT

**MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DA MÉDIA MENSAL DA FRAÇÃO DIFUSA DIÁRIA
A PARTIR DE DADOS DE REANÁLISE METEOROLÓGICA**

Alegrete

2020

DANIELA DANIGNO KONRADT

**MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DA MÉDIA MENSAL DA FRAÇÃO DIFUSA DIÁRIA
A PARTIR DE DADOS DE REANÁLISE METEOROLÓGICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia *Stricto sensu* em Engenharia da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de Mestra em Engenharia.

Orientador: Prof. Felipe Denardin Costa
Co-orientador: Prof. Vagner Anabor
Co-orientador: Prof. Daniel Michelin dos Santos

Alegrete

2020

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

Konradt, Daniela Danigno

Modelos para determinação da média mensal da fração difusa
diária a partir de dados de reanálise meteorológica / Daniela
Danigno Konradt.

89 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA, 2020.

"Orientação: Felipe Denardin Costa".

1. Radiação solar difusa . 2. Fração difusa. 3. Análise de
dados e reanálise meteorológica. 4. Simulação numérica. 5.
Fenômenos de transporte e energia. I. Título.

©2020

Todos os direitos autorais reservados a Daniela Danigno Konradt. A reprodução de partes ou do todo deste
trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

End. Eletr.: konradtdaniela@gmail.com

DANIELA DANIGNO KONRADT

**MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DA MÉDIA MENSAL DA FRAÇÃO DIFUSA DIÁRIA
A PARTIR DE DADOS DE REANÁLISE METEOROLÓGICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Stricto sensu em Engenharia da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de Mestra em Engenharia.

Área de concentração: Fenômenos de Transporte

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em: 28 de agosto de 2020.

Banca examinadora:



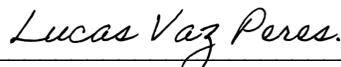
Prof. Dr. Felipe Denardin Costa
Orientador
(UNIPAMPA)



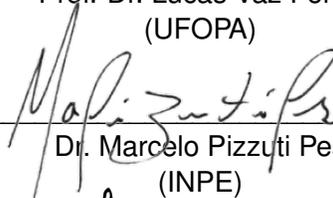
Prof. Dr. Wagner Anabor,
Co-orientador
(UFSM)



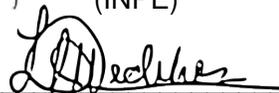
Dr. Daniel Michelin dos Santos,
Co-orientador
(UNIPAMPA)



Prof. Dr. Lucas Vaz Peres
(UFOPA)



Dr. Marcelo Pizzuti Pes
(INPE)



Prof. Dr. Luiz Eduardo Medeiros
(UNIPAMPA)

Ao meu amado pai, Arnaldo Konradt (Em memória).

AGRADECIMENTOS

Aos professores Felipe Denardin Costa, Daniel Michelin dos Santos e Vagner Anabor, pela orientação eficiente e comprometida neste trabalho.

À Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), por disponibilizar seu espaço, equipamentos e profissionais para disseminar conhecimento técnico-científico de qualidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro.

Aos meus amigos e colegas do antigo GESCA e atual LFCTA, pela companhia nos estudos, pelas conversas, pela empatia e paciência em compartilharem seu conhecimento comigo.

Aos meus amigos e amigas que de perto ou de longe sempre emanam boas energias.

Ao Ricardo Radaelli, que com toda serenidade, empatia e carinho passou a fazer parte da minha caminhada.

À minha família e, especialmente ao meu pai Arnaldo Konradt (Em memória), pelo apoio de sempre e por se orgulharem das minhas, que são as nossas conquistas.

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma análise sobre a radiação Solar, que visa estimar a radiação difusa através da média mensal fração difusa diária, utilizando dados da reanálise meteorológica ERA5. A validação dos dados de reanálise foi obtida a partir da comparação entre dados da mesma e os medidos pelas estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (EMA/INMET), utilizando a variável radiação global de 36 localidades. A partir da reanálise ERA5, foram calibrados modelos empíricos para a determinação da média mensal fração difusa diária, em 6 locais específicos, por meio de polinômios que utilizam dois diferentes parâmetros. Os chamados Grupos 1, 2 e 3, utilizam como parâmetro o número de horas de Sol, o índice de claridade da atmosfera e os dois parâmetros anteriores combinados, respectivamente. Cada grupo contém polinômios quadráticos e cúbicos. Para todas as estimativas foram calculados os coeficientes de correlação e os erros, a fim de testar a confiabilidade das mesmas, usando como referência a reanálise ERA5. Na maioria das localidades o melhor desempenho, ao estimar a média mensal fração difusa média diária, foi obtido pelo Grupo 3 que utiliza a razão entre o número efetivo de horas de sol e o número possível de horas de sol e o índice de claridade mutuamente nas estimativas. Correlações maiores que 0,97 foram obtidas para esse Grupo, não havendo distinção significativa entre a eficiência dos modelos quadrático e cúbico.

Palavras-chave: Radiação difusa. Fração difusa diária . Modelos empíricos.

ABSTRACT

The present study presents an analysis on the Solar radiation, which aims to estimate the diffuse radiation through the monthly mean of the diary diffuse fraction, using ERA5 meteorological reanalysis data. The validation of the reanalysis data was obtained from the comparison between the analysis data and those measured by the automatic stations of the National Institute of Meteorology (EMA/INMET), using the global radiation variable of 36 locations. From the ERA5 reanalysis, empirical models were calibrated for the determination of the monthly mean of the diary diffuse fraction, in 6 specific sites, by means of polynomials that use two different parameters. The so-called Groups 1, 2 and 3, use as parameter the number of hours of sunshine, the clarity index of the atmosphere and the two previous parameters combined, respectively. Each group contains quadratic and cubic polynomials. For all estimates correlation coefficients and errors were calculated in order to test their reliability, using as reference the ERA5 reanalysis. In most of the locations the best performance, when estimating the monthly mean of the diary diffuse fraction, was obtained by Group 3 that uses the ratio between the effective number of hours of sun and the possible number of hours of sun and the index of clarity mutually in the estimates. Correlations greater than 0.97 were obtained for this Group, and there was no significant distinction between the efficiency of the quadratic and cubic models.

Keywords: Diffuse radiation. Diary diffuse fraction. Empirical models

LISTA DE FIGURAS

1	EVOLUÇÃO CUMULATIVA DA POTÊNCIA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA INSTALADA NO MUNDO.....	19
2	EVOLUÇÃO DO CRESCIMENTO MUNDIAL DE INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS POR REGIÕES.	20
3	EVOLUÇÃO DE DAS INSTALAÇÕES ANUAIS DE ENERGIAS RENOVÁVEIS.	20
4	(A) DISTRIBUIÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA AO FIM DO QUARTO TRIMESTRE DE 2018. (B) EVOLUÇÃO TEMPORAL DA DISTRIBUIÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA DURANTE O ANO DE 2018 E PRIMEIRO TRIMESTRE DE 2019.....	21
5	BALANÇO DE RADIAÇÃO SOLAR EM PORCENTAGEM.....	22
6	DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA ABSORÇÃO DE RADIAÇÃO POR MOLÉCULAS DE (O ₃), ÁGUA (H ₂ O) E DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂).	23
7	COMPONENTES DA IRRADIÂNCIA SOLAR.	25
8	(A) ÂNGULO ZENITAL, INCLINAÇÃO, ÂNGULO AZIMUTAL DE SUPERFÍCIE, E ÂNGULO SOLAR AZIMUTAL PARA UMA SUPERFÍCIE INCLINADA. (B) VISTA DO ÂNGULO AZIMUTAL SOLAR SOBRE UM PLANO DE COORDENADAS NORTE-SUL	27
9	RELAÇÕES MÉDIAS ENTRE A FRAÇÃO DIFUSA E O COEFICIENTE DE CLARIDADE ATMOSFÉRICO: HORÁRIO (FIG. 9A); DIÁRIO (FIG. 9B) E MENSAL (FIG. 9C).	30
10	ESTRUTURA DO ESQUEMA DE RADIAÇÃO UTILIZADO NO ISF DO MODELO DO ECMWF.	35
11	ESTAÇÃO METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA DO INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (EMA/INMET) INSTALADA EM ALEGRETE - RS.....	37
12	SÉRIE TEMPORAL DA RADIAÇÃO GLOBAL HORÁRIA I FORNECIDA PELO INMET (LINHAS AZUIS) E PELA REANÁLISE ERA5 (LINHAS VERMELHAS), PARA MOSTARDAS - RS (PAINEL SUPERIOR). DIFERENÇA ENTRE I_{INMET} E I_{ERA5} (PAINEL CENTRAL) E A DIFERENÇA PERCENTUAL $\epsilon\%$ ENTRE AS MESMAS (PAINEL INFERIOR).	44
13	SÉRIE TEMPORAL DA RADIAÇÃO GLOBAL HORÁRIA I_{INMET} (LINHAS AZUIS) E I_{ERA5} (LINHAS VERMELHAS) PARA BENTO GONÇALVES - RS. DIFERENÇA ENTRE AS RADIAÇÕES SÃO EXPLANADAS NO PAINEL CENTRAL E A DIFERENÇA PERCENTUAL $\epsilon\%$, NO PAINEL INFERIOR.	45

14	RADIAÇÃO GLOBAL I , MEDIDAS NAS ESTAÇÕES AUTOMÁTICAS DO INMET COMPARADAS, NA FORMA DE DISPERSÃO, À OBTIDA ATRAVÉS DDA REANÁLISE ERA5, PARA FREDERICO WESTPHALEN (27,39 ^o S; 53,42 ^o O). OS QUADROS REPRESENTAM CADA ANO COMPLETO DE DADOS DISPONÍVEIS, SENDO ESTES, DADOS SÃO HORÁRIOS. PARA CADA ANO, A CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE AS VARIÁVEIS ESTÁ DISPONÍVEL NO CANTO SUPERIOR ESQUERDO.	47
15	DISPERSÃO DOS DADOS DE RADIAÇÃO GLOBAL, DOS ANOS COMPLETOS, DISPONÍVEIS PARA SANTA VITÓRIA DO PALMAR (33,74 ^o S; 53,37 ^o O).....	48
16	COMPARATIVO ENTRE A RADIAÇÃO GLOBAL MEDIDA PELO INMET E FORNECIDA PELA ERA5, PARA TRAMANDAÍ (30,01 ^o S; 50,13 ^o O), COM DADOS HORÁRIOS ENTRE OS ANOS DE 2009 E 2014. O COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS ESTÁ DISPONÍVEL EM CADA QUADRO.....	49
17	COMPARATIVO ENTRE AS RADIAÇÕES GLOBAIS MEDIDAS PELO INMET E PELA ERA5, URUGUAIANA (29,83 ^o S; 57,08 ^o O).	50
18	I MEDIDA NA EMA/INMET, NA CIDADE DE SANTA MARIA (29,72 ^o S; 53,72 ^o O), COMPARADA À I DA REANÁLISE ERA5. OS QUADROS REPRESENTAM CADA ANO COMPLETO DE DADOS DISPONÍVEIS, SENDO ESTES, DADOS SÃO HORÁRIOS E AS CORRELAÇÕES SÃO MOSTRADAS NO CANTO SUPERIOR ESQUERDO.	51
19	RADIAÇÃO GLOBAL (I) DA EMA/INMET COMPARADA À RADIAÇÃO GLOBAL FORNECIDA PELA REANÁLISE ERA5, PARA ALEGRETE - RS (29,70 ^o S; 55,52 ^o O). TODOS OS ANOS APRESENTARAM CORRELAÇÃO MUITO FORTE, COM $R > 0,9$ (VER CANTO SUPERIOR ESQUERDO DE CADA QUADRO.	52
20	DISTRIBUIÇÃO DAS CORRELAÇÕES MÉDIAS DA RADIAÇÃO GLOBAL DO INMET <i>VERSUS</i> ERA5, PARA AS LOCALIDADES E PERÍODOS DESCRITOS NA TABELA 2 PARA O RIO GRANDE DO SUL.	54
21	COMPARATIVO ENTRE OS POLINÔMIOS DO GRUPO 1, EXPRESSOS PELAS EQUAÇÕES 20 E 21 (LINHAS VERMELHA E AZUL, RESPECTIVAMENTE), E A FRAÇÃO DIFUSA \bar{K}_{ERA5} , PARA FREDERICO WESTPHALEN.	58
22	COMPARATIVO ENTRE OS POLINÔMIOS DO GRUPO 2, EXPRESSOS PELAS EQUAÇÕES 22 E 23, E \bar{K}_{ERA5} DADA PELA REANÁLISE ERA5, PARA FREDERICO WESTPHALEN.	59
23	ESTIMATIVA DE \bar{K} , EXPRESSO PELAS EQUAÇÕES 24 E 25 (GRUPO 3), COMPARADA AO CALCULADO ATRAVÉS DA REANÁLISE ERA5, PARA FREDERICO WESTPHALEN.	60
24	COMPARATIVO ENTRE OS POLINÔMIOS DO GRUPO 1 (EQUAÇÕES 26 E 27), E A FRAÇÃO DIFUSA DDA REANÁLISE ERA5, PARA SANTA VITÓRIA DO PALMAR.	62

25	POLINÔMIOS DO GRUPO 2 (EQUAÇÕES 28 E 29) COMPARADOS A $\bar{K}_{ERA 5}$ CALCULADA A PARTIR DA REANÁLISE ERA5, PARA SANTA VITÓRIA DO PALMAR.	63
26	\bar{K} OBTIDO PELAS EQUAÇÕES 30 E 31 (GRUPO 3) COMPARADO AO CALCULADO ATRAVÉS DA REANÁLISE ERA5, PARA SANTA VITÓRIA DO PALMAR.....	64
27	COMPARATIVO ENTRE OS POLINÔMIOS DO GRUPO 1 (EQUAÇÕES 32 (LINHA VERMELHA) E 33 (LINHA AZUL)), E $\bar{K}_{ERA 5}$ CALCULADA A PARTIR DDA REANÁLISE ERA5 (LINHA PRETA), PARA TRAMANDAÍ.	66
28	O MESMO QUE A FIGURA 27, ENTRETANDO UTILIZANDO O GRUPO 2 DE POLINÔMIOS (EQUAÇÕES 34 E 35).....	67
29	FRAÇÃO DIFUSA \bar{K} OBTIDA PELAS EQUAÇÕES 36 E 37 COMPARADO À REANÁLISE ERA5, PARA TRAMANDAÍ.	68
30	POLINÔMIOS DO GRUPO 1 (EQUAÇÕES 38 (LINHA VERMELHA) E 39 (LINHA AZUL)) E A FRAÇÃO DIFUSA DADA PELA ERA5 (LINHA PRETA), PARA URUGUAIANA ENTRE 2007 E 2014.	70
31	GRUPO 2 (EQUAÇÕES 40 E 41) COMPARADO A $K_{ERA 5}$ CALCULADA A PARTIR DA REANÁLISE ERA5, PARA URUGUAIANA, NO PERÍODO DE 2007 A 2014.	71
32	ESTIMATIVA DA FRAÇÃO DIFUSA, ATRAVÉS DAS EQUAÇÕES DO GRUPO 3 (EQUAÇÕES 42 E 43), COMPARADA AO CÁLCULO ATRAVÉS DA REANÁLISE ERA5, PARA URUGUAIANA.	72
33	COMPARATIVO ENTRE OS POLINÔMIOS DO GRUPO 1 (EQUAÇÕES 44 E 45) E FRAÇÃO DIFUSA $\bar{K}_{ERA 5}$, PARA SANTA MARIA.	74
34	FRAÇÃO DIFUSA \bar{K} ESTIMADA PELO GRUPO 2 (EQUAÇÕES 46 E 47) COMPARADO AO CALCULADO A PARTIR DDA REANÁLISE ERA5, PARA SANTA MARIA.....	75
35	ESTIMATIVA DA FRAÇÃO DIFUSA PELO GRUPO 3 (EQUAÇÕES 48 E 49) E $\bar{K}_{ERA 5}$, PARA SANTA MARIA.....	76
36	COMPARATIVO, PARA ALEGRETE - RS, ENTRE \bar{K} ESTIMADO PELO GRUPO 1 (EQUAÇÕES 50 E 51 - LINHAS VERMELHA E AZUL, RESPECTIVAMENTE) E O OBTIDO A PARTIR DOS DADOS A REANÁLISE ERA5 (LINHA PRETA).....	78
37	O MESMO QUE A FIGURA 36, ENTRETANTO UTILIZANDO O GRUPO 2 (POLINÔMIOS 52 E 53).	79
38	ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO DIFUSA, ATRAVÉS DE \bar{K} , UTILIZANDO O GRUPO 3 (EQUAÇÕES 54 E 55) COMPARADOS À ESTIMATIVA ATRAVÉS DO ERA5, PARA ALEGRETE.	80

LISTA DE TABELAS

1	POSICIONAMENTO GEOGRÁFICO DAS ESTAÇÕES AUTOMÁTICAS (EMA) DO INMET	37
2	MÉDIAS DAS CORRELAÇÕES (\bar{R}) PARA A RADIAÇÃO GLOBAL (I) ENTRE A MEDIDA EM SUPERFÍCIE (I_{INMET}) E A APRESENTADA PELA REANÁLISE (I_{ERA5})	52
3	MÉDIA DAS CORRELAÇÕES ENTRE A FRAÇÃO DIFUSA ESTIMADA PELOS POLINÔMIOS (QUADRÁTICO E CÚBICO) E A OBTIDA ATRAVÉS DA REANÁLISE ERA5 (\bar{R}_Q E \bar{R}_C , RESPECTIVAMENTE). MÉDIA DO ERRO MÉDIO ABSOLUTO (\overline{MABE}) E DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO (\overline{RMSE}) ENTRE ESSAS ESTIMATIVAS E K_{ERA5} . OS VALORES SE REFEREM A MÉDIA PARA O PERÍODO ANALISADO EM CADA LOCAL. OS ÍNDICES Q E C REFEREM-SE AOS MODELOS QUADRÁTICO E CÚBICO, RESPECTIVAMENTE.	82

LISTA DE SIGLAS

<i>MME</i>	Ministério de Minas e Energia
<i>PDE</i>	Plano Decenal de Energia Elétrica
<i>PCH's</i>	Pequenas Centrais Hidrelétricas
<i>ECMWF</i>	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
<i>INMET</i>	Instituto Nacional de Meteorologia
<i>IEA</i>	INternational Energy Agency
O_3	Ozônio
H_2O	Água
CO_2	Dióxido de carbono
<i>EPE</i>	Empresa de Pesquisa Energética

LISTA DE SÍMBOLOS

G	Irradiância solar
I	Irradiação solar horária
H	Irradiância solar diária
G_0	Irradiância solar extraterrestre
I_0	Irradiação solar extraterrestre horária
H_0	Irradiação solar extraterrestre diária
G_n	Irradiância solar direta normal
I_n	Irradiação solar direta normal horária
H_n	Irradiação solar direta normal diária
G_{dir}	Irradiância solar direta horizontal
I_{dir}	Irradiação solar direta horizontal horária
H_{dir}	Irradiação solar direta horizontal diária
G_{dif}	Irradiância solar difusa horizontal
I_{dif}	Irradiação solar difusa horizontal horária
H_{dif}	Irradiação solar difusa horizontal diária
ϕ	Latitude local
δ	Declinação solar
β	Inclinação
α	Azimute da superfície
ω	Ângulo horário
θ	Ângulo de incidência
θ_z	Ângulo azimutal
α_s	Ângulo de altitude solar
G_{SC}	Constante solar
n	Dia juliano

R_{dir}	Taxa entre a a radiação solar direta sobre uma superfície inclinada para radiação solar direta sobre uma superfície horizontal
ρ_g	Fator de reflexão difusa no solo da irradiação solar global horária
I_T	Irradiação solar horária sobre uma superfície inclinada
k_T	Índice de claridade atmosférica horária
K_T	Índice de claridade atmosférica diária
\overline{K}_T	Índice de claridade atmosférica mensal
k	Fração difusa horária
\overline{K}	Média mensal da fração difusa diária
\overline{H}_{dif}	Média mensal da irradiação solar difusa
\overline{H}	Média mensal da irradiação solar diária
λ	comprimento de onda eletromagnética

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	REVISÃO TEÓRICA	18
2.1	O SOL COMO FONTE DE ENERGIA	18
2.2	ENERGIA SOLAR NO CENÁRIO MUNDIAL	18
2.3	RADIAÇÃO SOLAR	21
2.3.1	Componentes da Radiação Solar	24
2.3.2	Relações geométricas e variáveis utilizadas para calcular a radiação solar	26
2.4	COMPONENTES DA RADIAÇÃO NO CÁLCULO DA RADIAÇÃO SOLAR ABSORVIDA POR UM COLETOR PLANO	27
2.5	MODELOS DE RADIAÇÃO DIFUSA	29
2.6	REANÁLISE	31
2.6.1	Reanálise ERA5	33
2.6.1.1	Estimava dos fluxos superficiais de radiação na reanálise ERA5	33
3	METODOLOGIA	36
3.1	DADOS DO INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET	36
3.2	DADOS DE REANÁLISE	39
3.3	MODELOS PARA MÉDIA MENSAL DA FRAÇÃO DIFUSA DIÁRIA	39
3.4	PARÂMETROS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS	41
4	RESULTADOS	43
4.1	VALIDAÇÃO DA RADIAÇÃO GLOBAL	43
4.2	ESTIMATIVA PARA A RADIAÇÃO DIFUSA	55
4.2.1	Determinação da média mensal da fração difusa diária \overline{K}	55
4.2.1.1	Frederico Westphalen	56
4.2.1.2	Santa Vitória do Palmar	60
4.2.1.3	Tramandaí	64
4.2.1.4	Uruguaiana	68
4.2.1.5	Santa Maria	72
4.2.1.6	Alegrete	76
4.2.2	Estatística das estimativas da fração difusa	80
5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	83
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

1 INTRODUÇÃO

O emprego de fontes alternativas para geração de energia elétrica, tanto na matriz energética mundial, como na brasileira, já é um fato consolidado. De acordo com dados disponibilizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) no Balanço Energético Nacional (BEN)-2019, que tem como ano base 2018, a participação das energias renováveis na matriz elétrica brasileira representou 83,3% do total (Empresa de Pesquisa Energética, 2020).

Segundo o Plano Decenal de Energia Elétrica 2024 (PDE 2014-2024) (Empresa de Pesquisa Energética, 2020), o potencial de crescimento da participação de fontes de energia renovável: solar, eólica, biomassa e Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs)- na capacidade instalada do Sistema Interligado Nacional (SIN) de energia elétrica até o final de 2024, será em torno de 28% alcançando 60 GW de potência instalada, aproximadamente três vezes mais que a instalada em 2014, que era de 22%. Dentre as fontes com maior expectativa de crescimento está a energia solar. A previsão é que fonte solar contribua com aproximadamente 3,3% da capacidade instalada total, o que corresponde à 7.000 MW.

A energia solar apresenta-se como uma das fontes de geração de energia mais promissoras da atualidade. O emprego da energia oriunda do sol está presente principalmente em processos químicos, físicos e térmicos, sejam eles naturais, como a fotossíntese e processos atmosféricos, ou tecnológicos, como aquecimento térmico de fluidos e conversão fotovoltaica (PEREIRA et al., 2017).

Influenciada por diferentes fatores, a disponibilidade mundial do recurso solar, varia nas escalas temporal e espacial. A distância entre a Terra e o Sol, condições de relevo, latitude, condições atmosféricas e variáveis climatológicas são alguns dos exemplos que podem influenciar essa fonte energética. O Brasil, por exemplo, que está localizado em uma região intertropical, apresenta índices de radiação solar elevados. Quando comparado com a Europa, a região sul Brasil, registra índices de irradiação global horizontal de aproximadamente $4,4 \text{ kW h m}^{-2}$, quatro vezes maior do que a observada para região de Berlim na Alemanha, $1,054 \text{ kW h m}^{-2}$. Essa vantagem, pode favorecer o aproveitamento dessa fonte em processos de conversão de energia elétrica em larga escala, indo ao encontro de políticas públicas modernas que priorizam o aproveitamento de fontes renováveis para geração de energia (PEREIRA et al., 2017; PVPS, 2020).

Em empreendimentos fotovoltaicos é indispensável que se conheçam os valores de radiação solar da região de interesse. A radiação solar se propaga no espaço sob forma de ondas eletromagnéticas. As ondas atingem a superfície terrestre de forma direta ou podem interagir com os componentes atmosféricos, sendo absorvidos ou os refletidos. Dessa forma, a Radiação solar global é dada pelo somatório de duas componentes, a radiação direta e a radiação difusa e podem ser expressas em termos de potência por área

(CROTTI; RAMPINELLI, 2018). O variável mais facilmente medida é o de radiação global. A componente direta pode ser medida de forma específica utilizando piroheliômetros (SOLAR, 2013) e (GUIMARÃES, 2003). Já a componente difusa, depende de outros fatores. Souza et al. (2012), afirma que tanto a radiação direta como a refletida podem ser quantificadas utilizando algoritmos simples, mas a componente difusa necessita de correções de natureza isotrópicas e anisotrópicas ¹. Lemos et al. (2017) salienta que os modelos que avaliam a radiação solar e principalmente a difusa, devem considerar as características específicas dos dados climatológicos analisados para que as informações obtidas sobre essa variável sejam confiáveis.

Modelos matemáticos como os desenvolvidos por Ridley, Boland e Lauret (2010), Bakirci (2015), Song et al. (2020) e outros, tentam determinar com maior precisão a radiação difusa. Tais modelos costumam considerar que variáveis como: índice de claridade, cobertura de nuvens, temperatura, ventos, umidade relativa, sazonalidade, latitude entre outras grandezas que podem influenciar no espalhamento da radiação na atmosfera. Lemos et al. (2017) destaca ainda que as diversidades climatológicas brasileiras são peculiares e, somadas ao baixo número de registros de medições podem tornar o processo de modelagem do comportamento da radiação difusa mais demorado.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal determinar e construir modelos matemáticos para determinação da média mensal da fração difusa diária em diferentes regiões do estado do Rio Grande do Sul.

Os objetivos específicos são:

- Validar os dados Radiação solar do Modelo de Reanálise Meteorológica ERA5 utilizando como base para comparação os dados fornecidos registrados pelas estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) instaladas no Rio Grande do Sul.
- Utilizar os dados validados para calibração de modelos matemáticos utilizados para determinar a média mensal da fração difusa diária da radiação solar.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho foi estruturado da seguinte forma: no Capítulo 2, é apresentada a revisão teórica, onde é apresentado um breve panorama da situação energia fotovoltaica no mundo e são introduzidos conceitos básicos que serão utilizados no trabalho. No Capí-

¹Isotropia da radiação é o efeito que ocorre quando o espalhamento da radiação é uniforme tanto no sentido atmosfera-solo como no sentido atmosfera-espaco. Também identificado como Espalhamento de *Rayleigh*. Anisotropia da radiação é o efeito que ocorre quando o espalhamento da radiação não é mais uniforme e o fluxo radioativo é maior no sentido atmosfera-solo do que atmosfera-espaco. Também identificado como Espalhamento de *Mie* (PAI, 2005) e (DUFFIE; BECKMAN, 2013)

tulo 3, é descrita a metodologia empregada neste estudo, como: localizações, as variáveis estudadas, expressões matemáticas e descrição dos modelos. No Capítulo 4, são apresentados os resultados da validação dos dados utilizados e da calibração dos modelos. Por fim, no Capítulo 5, são discutidos aspectos gerais dos resultados e possíveis soluções para os problemas verificados, assim como, perspectivas de trabalhos futuros.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 O SOL COMO FONTE DE ENERGIA

O sol é a estrela do nosso sistema solar. Dentre suas propriedades, podem ser citadas: raio médio de 696.000 km, composição química variada (Hidrogênio (92,1%), Hélio (7,8%), Oxigênio (0,061%), entre outros), e temperatura na superfície de 5500 K.

O Sol dissipa sua energia através de ondas eletromagnéticas que se propagam no espaço de forma radial, na velocidade da luz e levam em torno de oito minutos para atingir a superfície terrestre (A órbita que a Terra descreve ao redor do Sol tem um raio médio de $1,495 \times 10^{11}$ m). A ABNT através da NBR 10899 define radiação solar como “forma de transferência de energia advinda do sol, por meio da propagação de ondas eletromagnéticas ou fótons” (NBR, 2006). Essas ondas se propagam no vácuo, em todas as direções em diferentes frequências e comprimentos.

Desde de os primórdios da civilização humana a radiação proveniente do Sol é usada como fonte de energia. Nos últimos 6000 anos a humanidade tem utilizado a energia solar seja para aquecer e iluminar prédios, como na China, Grécia e Roma antigas, onde os projetos arquitetônicos eram aprimorados visando a economia de madeira, que era principal fonte de aquecimento durante os invernos rigorosos (PERLIN, 2013). Mas também pode ter sido usada como arma para queimar inimigos e cidades, através da utilização de lentes e espelhos para focar a radiação em um ponto, tal como na lenda da batalha do cerco a Siracusa (214-212 a.C.). Essa narrativa conta que teria sido utilizado um espelho, inventado por Arquimedes, para queimar os navios romanos (CHESTERMAN; HUFFMAN, 2010).

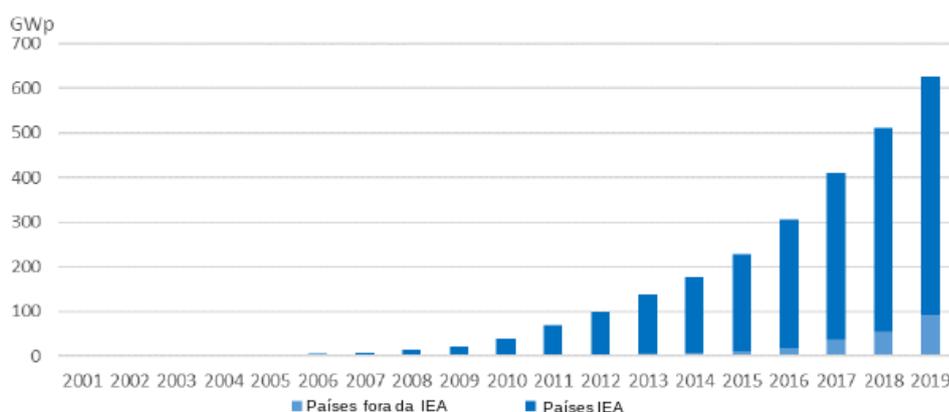
Entretanto, somente próximo à metade do século XIX, o físico Francês Alexandre-Edmond Becquerel observou a presença de uma corrente elétrica que era gerada quando um, de dois eletrodos metálicos, imersos em uma solução ácida, era iluminado (COPELAND; BLACK; GARRETT, 1942; SPANGGAARD; KREBS, 2004). Apesar do interesse comercial, a primeira célula fotovoltaica, baseada em silício, foi reportada em 1941 por Ohl e tinha uma eficiência de menos de 1% (GREEN, 2009). Em 1954 foi desenvolvida nos Laboratórios Bell uma célula fotovoltaica de silício com eficiência de 6% (SPANGGAARD; KREBS, 2004; GREEN, 2009). Com o avanço da tecnologia e o desenvolvimento de novos materiais, atualmente, as células fotovoltaicas podem alcançar até 25% de eficiência (GREEN, 2009; CHEN et al., 2019).

2.2 ENERGIA SOLAR NO CENÁRIO MUNDIAL

Segundo a International Energy Agency (IEA), o emprego da energia solar fotovoltaica cresce consideravelmente a cada ano. O relatório anual da IEA 2019 mostra que a capacidade total de geração Fotovoltaica instalada no mundo era de pelo menos 627 GW

(PVPS, 2020). Os países participantes do Programa de Sistemas de Energia Fotovoltaica (PVPS)² realizado pela IEA representaram juntos 534,5 GW de instalações fotovoltaicas acumuladas, principalmente em investimentos ligados à rede elétrica. Já os países que não fazem parte deste programa representam menos de 92,1 GW (PVPS, 2020). A Fig. 1 mostra a evolução cumulativa das instalações fotovoltaicas no mundo nas últimas duas décadas. É possível verificar o crescimento acentuado da potência instalada, principalmente a partir da segunda metade dos anos 2010 (Fig. 1).

Figura 1 – Evolução cumulativa da potência de energia fotovoltaica instalada no mundo.

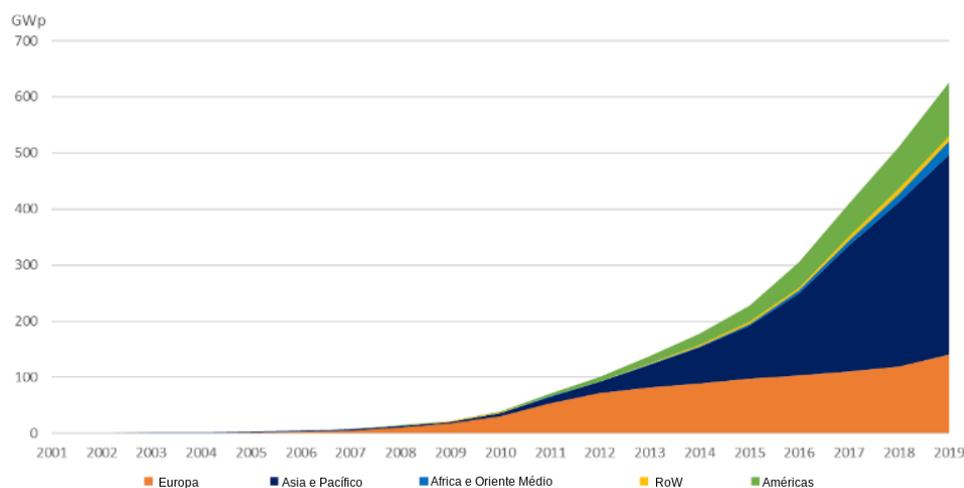


Fonte: Adaptado de PVPS (2020).

Até o começo da última década, as instalações fotovoltaicas estavam localizadas na Europa (Fig. 2). Todavia, esse cenário mudou com o crescimento da geração fotovoltaica na Ásia, principalmente na China, que hoje ao final de 2019 era responsável por aproximadamente 32% da energia solar fotovoltaica gerada no mundo. Mais do que a Europa que é responsável por 22% do total cumulativo instalado. Já as Américas representam 15% da potência fotovoltaica instalada, sendo que a maior parte está instalada nos Estados Unidos e em alguns países como Brasil, México e Argentina. Em 2019, houve a ampliação da matriz energética fotovoltaica no Brasil, com a instalação de 2 GW (PVPS, 2020).

²A IEA realiza um programa abrangente de cooperação energética com mais de 30 membros e com a participação da Comissão Europeia realiza o Programa de Sistemas de Energia Fotovoltaica (IEA PVPS) é um dos acordos colaborativos de pesquisa e desenvolvimento países membros. Os países participantes são: Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, Chile, China, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Israel, Itália, Japão, Coreia do Sul, Malásia, México, Marrocos, Holanda, Noruega, Portugal, África do Sul, Espanha, Suécia, Suíça, Tailândia, Turquia e Estados Unidos da América.

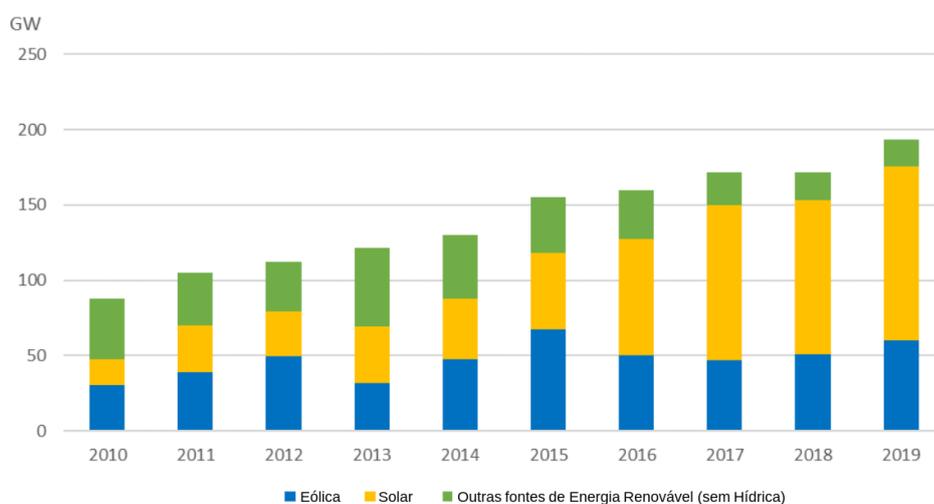
Figura 2 – Evolução do crescimento mundial de instalações fotovoltaicas por regiões.



Fonte: Adaptado de (PVPS, 2020).

Outro aspecto importante que o relatório anual da IEA apresenta é a evolução da energia Solar fotovoltaica (daqui para frente simplesmente referida como energia Solar), frente as demais fontes de energia renováveis. A Fig. 3 mostra a evolução da geração de energia por fontes renováveis. Em contante crescimento frente as demais fontes de energia, em 2016 se tornou a principal matriz de energia renovável mundial, ultrapassando a energia eólica. E no ano de 2019 alcançou 59% da geração de energia elétrica proveniente de fontes renováveis (PVPS, 2020).

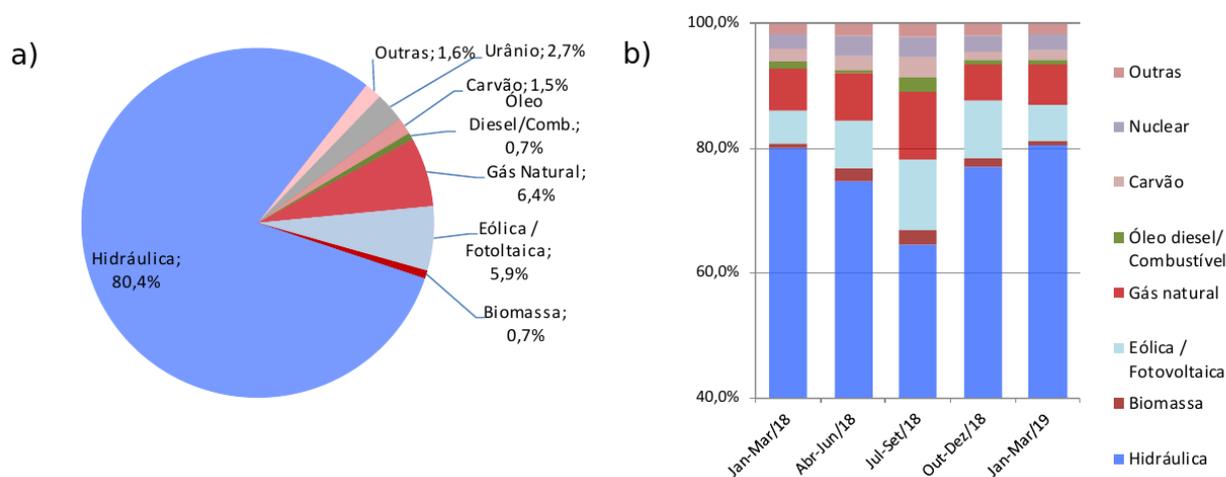
Figura 3 – Evolução de das instalações anuais de energias renováveis.



Fonte: Adaptado de (PVPS, 2020).

Em constante crescimento, o Brasil também tem agregado à sua matriz energética a fonte solar. A Figura 4 apresenta a distribuição da matriz energética brasileira (Fig. 4a) e a evolução temporal da mesma durante o ano de 2018 e no primeiro trimestre de 2019. Apesar da geração de energia Eólica/Fotovoltaica ser responsável por 5,9% da energia elétrica gerada no Brasil em 2018 e no primeiro trimestre de 2019, sendo a terceira fonte de energia na matriz nacional, durante os meses de julho a dezembro de 2018 a geração de energia Eólica/Fotovoltaica somente ficou atrás da geração de energia Hidráulica que é responsável por mais de 80% da matriz energética nacional.

Figura 4 – (a) Distribuição da matriz energética brasileira ao fim do quarto trimestre de 2018. (b) Evolução temporal da distribuição da matriz energética brasileira durante o ano de 2018 e primeiro trimestre de 2019.



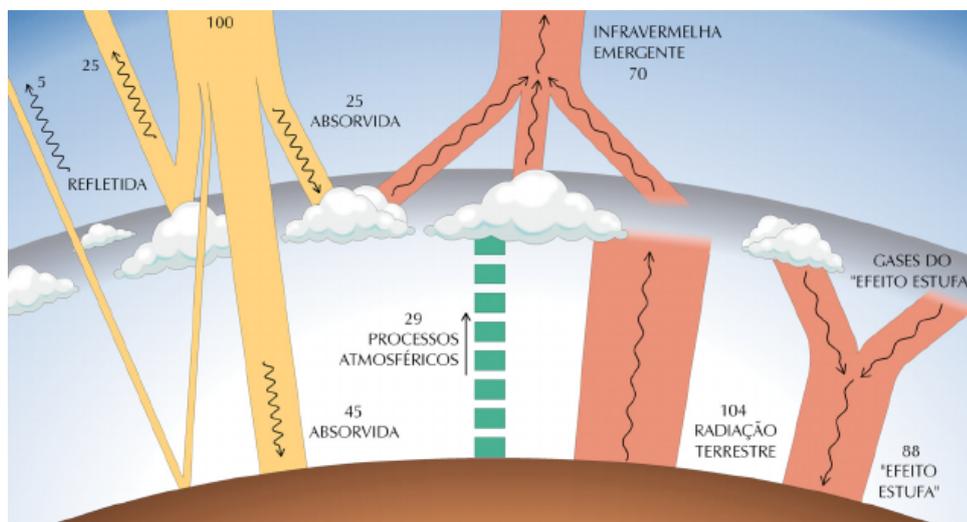
Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2018).

Sendo o foco do trabalho discutir os modelos para estimativa da média mensal da fração difusa da radiação solar, nas próximas seções serão apresentados alguns conceitos básicos sobre radiação Solar e as suas componentes.

2.3 RADIAÇÃO SOLAR

Estima-se que dos 100% de radiação solar que chega ao topo da atmosfera, aproximadamente 50% incide à superfície sem sofrer interferências, sendo absorvidas pela terra e o mar e aproximadamente 20% é absorvido pela atmosfera e as nuvens. As quantidades restantes ou são absorvidas ou espalhadas (atingindo a superfície com direção diferente da que incidiu no topo da atmosfera) ou refletidas para o espaço. Esses processos compõem o chamado Balanço de Energia para o sistema Terra-Atmosfera, sendo influenciado diretamente pela constituição da atmosfera e do comprimento da onda incidente (CROTTI; RAMPINELLI, 2018) e (LUTGENS; TARBUCK; TUSA, 1995). A Fig. 5 apresenta um esquema que descreve tal balanço.

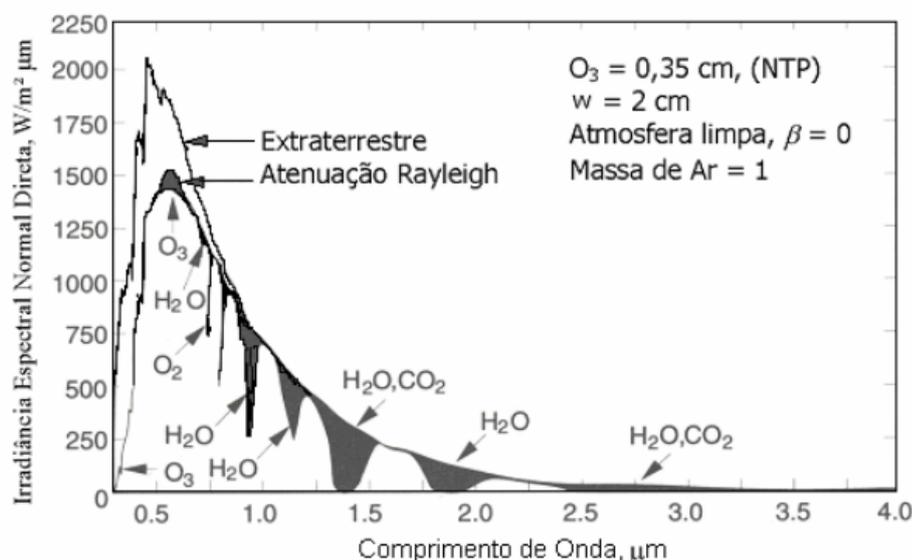
Figura 5 – Balanço de radiação solar em porcentagem.



Fonte: Adaptado de Pereira et al. (2017)

O espalhamento ocorre pela presença de gases, aerossóis, vapor d'água, poeira e outros e depende do número de moléculas, tamanho de partículas e comprimento de massa de ar que a radiação deve atravessar. A teoria do espalhamento de *Rayleigh* aponta que moléculas dos gases oxigênio e nitrogênio são os maiores e principais espalhadores em atmosferas limpas. Em atmosferas encobertas, além do espalhamento de *Rayleigh*, pode-se considerar como mais importante o espalhamento de *Mie* pois, este ocorre quando o tamanho das partículas é tão grande (ou maior) quanto o comprimento de onda da radiação (MARTINAZZO, 2004) e (DUFFIE; BECKMAN, 2013). Um dos exemplos que o efeito do espalhamento de *Rayleigh* pode gerar é apresentado na Figura 6. Nela é possível observar como ocorre a distribuição espectral da absorção de radiação pelas moléculas de ozônio (O_3), água (H_2O) e dióxido de carbono (CO_2). Ainda conforme a teoria do espalhamento *Rayleigh*, o coeficiente de espalhamento varia com comprimento de onda por λ^{-4} .

Figura 6 – Distribuição espectral da absorção de radiação por moléculas de (O_3), água (H_2O) e Dióxido de carbono (CO_2).



Fonte: Adaptado de Martinazzo (2004) e Duffie e Beckman (2013)

Além do espalhamento, gases como Ozônio (O_3), Dióxido de carbono (CO_2), e aerossóis são também capazes de absorver radiação. Pelo processo de reflexão e ainda absorção, as nuvens, podem ser citadas como fator contribuinte na diminuição da quantidade de radiação incidente na superfície terrestre (CROTTI; RAMPINELLI, 2018) e (MARTINAZZO, 2004).

Para um observador situado na superfície terrestre além das componentes direta e difusa, a radiação solar também apresenta uma terceira componente, a radiação refletida, que resulta da reflexão da radiação solar na superfície. Tal componente depende das propriedades óptica ou albedo da superfície (MAGARREIRO; FREITAS; BRITO, 2013).

“O albedo ou coeficiente de reflexão da superfície é dado pela razão entre a radiação eletromagnética refletida pela superfície e a incidente”(SOUZA; ESCOBEDO; TORNERO, 1999). Esse coeficiente depende principalmente da cor da superfície e varia de acordo com suas características ópticas, ou seja, cada material apresenta um comportamento diferente em relação à quantidade de radiação absorvida e refletida em função das propriedades espectrais da radiação incidente (RELVA,) e (FERNANDES, 2015). Por exemplo, em solos descobertos o valor médio de albedo é em torno de 10 à 25%. Para superfícies cobertas, como florestas, de 10 à 15%. A água apresenta o menor albedo, por volta de 5%, enquanto que, neve e areia têm os maiores albedos, entre 40 e 90%. Pode ser citado ainda, o albedo das nuvens o qual varia de acordo com a espessura das mesmas. Nuvens espessas apresentaram maiores albedos, entre 70 e 90% e nuvens mais finas entre 25 e 50%. Sendo assim, quanto maior o albedo da superfície menor é a radiação solar

absorvida por ela e menor a sua temperatura (PEREIRA; VRISMAN; GALVANI, 2002).

Relva (), aponta a importância de estimar a quantidade de radiação refletida em dois casos. O primeiro, diz respeito a radiação refletida pelo solo e que incide em placas solares (em sua maioria inclinadas) de empreendimentos energéticos e o segundo, sobre o albedo das superfícies próximas aos equipamentos de medição de radiação, como por exemplo, piranômetros. A ressalva é feita pois, a componente difusa é a que apresenta maiores incertezas nas medições e por isso poderia afetar de forma negativa a eficiência de conversão de energia e nos dados medidos.

Segundo Magarreiro, Freitas e Brito (2013), para estudos de aproveitamento de energia solar é importante caracterizar a radiação solar horária incidente no local. Para os autores, esse seria um problema de fácil solução se as variáveis a serem consideradas fossem somente latitude local, hora do dia e ângulo de incidência da radiação sobre a superfície. No entanto, é preciso considerar os processos de dispersão e absorção que ocorrem na atmosfera terrestre pois, esses interferem na quantidade e no modo com o qual a radiação incide na superfície. Ainda conforme os autores, tais processos são influenciados por condições meteorológicas difíceis de prever com precisão e por isso, desenvolver e aplicar modelos matemáticos empíricos baseados em medidas experimentais são importantes.

2.3.1 Componentes da Radiação Solar

A radiação solar é dividida em duas componentes: Radiação Direta, que a porção de radiação que chega a superfície da Terra sem ser afetada pela atmosfera; e Radiação Difusa, que é a radiação que chega na superfície após sua direção ser alterada pelo espalhamento na atmosfera (DUFFIE; BECKMAN, 2013). A soma da Radiação Direta em Superfície e da Radiação Difusa em Superfície é conhecida como Radiação Global.

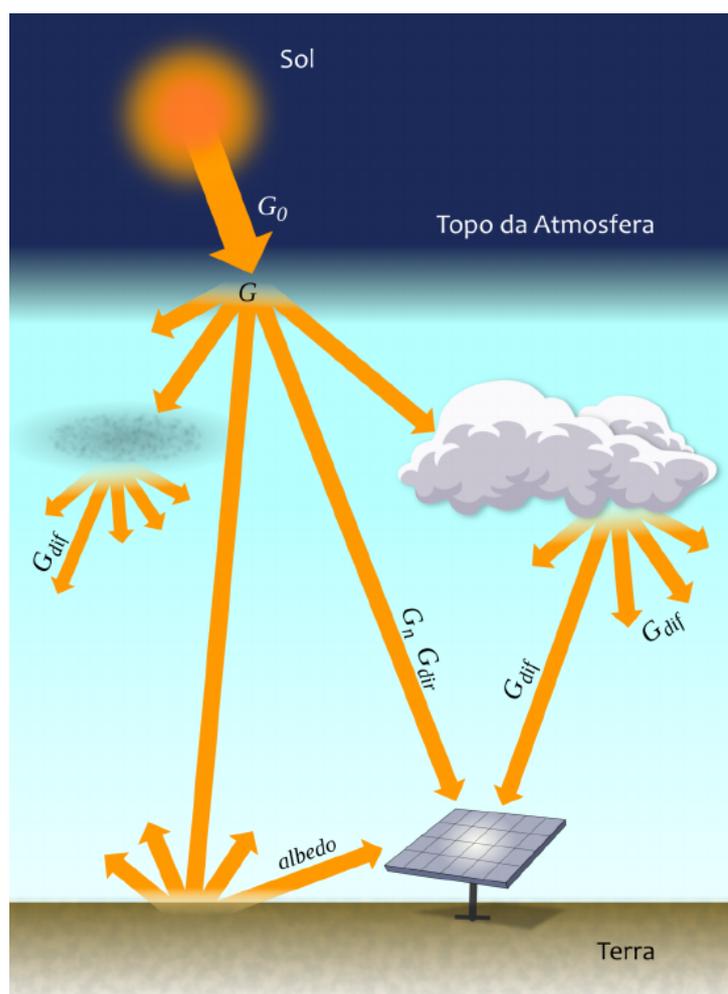
A taxa com a qual a energia na forma de radiação, atinge uma superfície é chamada de irradiância G ($W m^{-2}$). Por outro lado, a integral da irradiância no tempo é definida como irradiação solar ($J m^{-2}$). A irradiação depende do período de integração, podendo ser por uma hora (I), ou por um dia (H). Tanto a irradiância Solar (G), quanto a irradiação Solar horária (I) e irradiação Solar diária (H) possuem as seguintes componentes (DUFFIE; BECKMAN, 2013; PEREIRA et al., 2017) (Fig. 7):

- Extraterrestre (G_0 ; I_0 ; H_0): refere-se a taxa de energia ou energia na forma de radiação que ainda não foi afetada pela atmosfera da Terra;
- Direta Normal (G_n ; I_n ; H_n): refere-se a taxa de energia ou energia na forma de radiação que não é afetada pelo espalhamento atmosférico e incide perpendicularmente à superfície;
- Direta horizontal (G_{dir} ; I_{dir} ; H_{dir}): refere-se a taxa de energia ou energia na forma de

radiação é afetada pelo espalhamento atmosférico e que incide sobre uma superfície horizontal. pode ser determinada através do produto da Radiação direta normal com o cosseno do ângulo zenital (PEREIRA et al., 2017).

- Difusa horizontal (G_{dif} ; I_{dif} ; H_{dif}): refere-se a taxa de energia ou energia na forma de radiação que tem sua direção alterada pelo espalhamento atmosférico e que incide sobre uma superfície horizontal.
- Global (G ; I ; H): refere-se a soma das taxa de energia ou energia na forma de radiação Direta horizontal e Difusa horizontal ($G = G_{dir} + G_{dif}$; $I = I_{dir} + I_{dif}$; $H = H_{dir} + H_{dif}$);
- Albedo: representa a razão entre radiação refletida pela superfície e a radiação incidente sobre a superfície. É uma grandeza adimensional.

Figura 7 – Componentes da irradiância Solar.



A radiação solar extraterrestre varia ao longo do ano devido ao movimento astronômicos da Terra. Para seu cálculo é necessário definir algumas relações geométricas, como será visto a seguir.

2.3.2 Relações geométricas e variáveis utilizadas para calcular a radiação solar

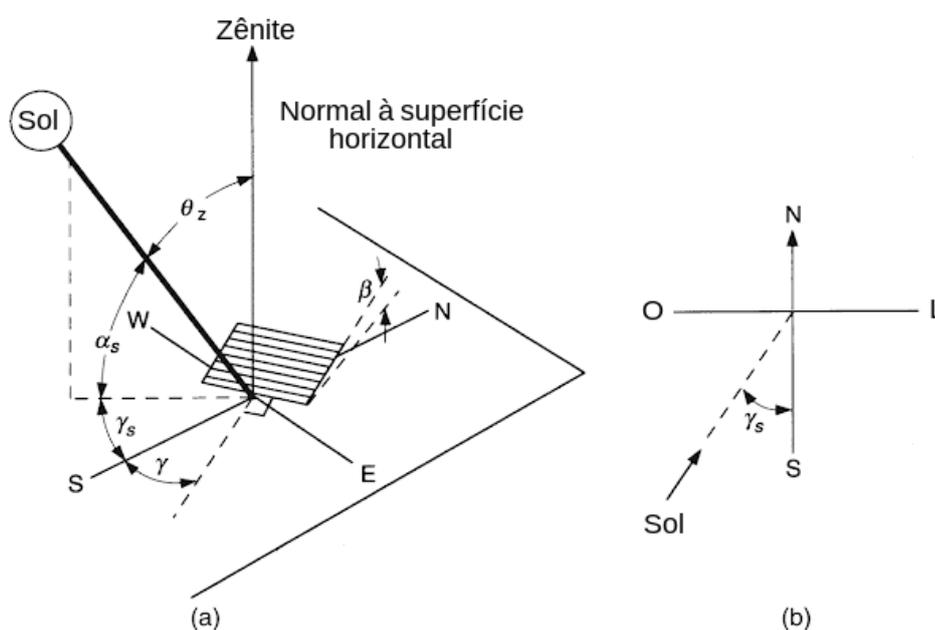
A Terra descreve movimentos de rotação, translação, entre outros. A rotação é responsável pela duração do dia, enquanto que a o movimento de translação, ao longo de sua órbita ao redor do Sol, qual define a duração do ano. O movimento de rotação da Terra ocorre em um eixo que faz um ângulo de $23,4^\circ$ com a reta normal ao plano de translação da Terra. Essa inclinação faz com que durante diferentes instantes durante um período de órbita do Planeta a quantidade de radiação Solar que chega ao hemisférios norte e sul da Terra seja diferente, o que dá origem às estações do ano (MACAGNAN, 2010).

Dessa forma, para estimar a quantidade de radiação solar que incide sobre uma superfície plana são necessárias algumas relações geométricas como mostrado na Fig. 8. Fixando o sistema de referência em uma superfície plana sobre a Terra, o conjunto de ângulos, cujos sinais são definidos por convenção são os seguintes (DUFFIE; BECKMAN, 2013):

- Latitude (ϕ): é definida como a localização angular a norte ou a sul do equador ($-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$, sendo o sinal positivo indicando o norte);
- Declinação (δ): é definida como a posição angular do sol ao meio dia, com relação ao plano do equador ($-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$). Por convenção o sinal positivo indica o norte.
- Inclinação (β): é definida como o ângulo entre a superfície plana e a horizontal ($0 \leq \beta \leq 180^\circ$).
- Azimute da superfície (γ): é definido como o desvio da projeção no plano horizontal da normal à superfície do meridiano local. Com zero no sul, deslocamentos para o leste são negativos e deslocamento para o oeste positivos ($-180 \leq \gamma \leq 180^\circ$).
- Ângulo horário (ω): é definido como o deslocamento do leste ou oeste do meridiano local devido à rotação da Terra. Por convenção, o período da tarde é positivo.
- Ângulo de incidência (θ): é definido como o ângulo entre a radiação incidente e a reta normal à superfície.
- Ângulo zenital (θ_z): é definido como o ângulo de incidência da radiação solar em em uma superfície horizontal.

- Ângulo de altitude Solar (α_s): é definido como o ângulo entre a linha do sol e a horizontal.
- Ângulo Solar azimutal: é definido como o deslocamento a partir do sul da radiação Solar, em um plano horizontal. Por convenção deslocamentos a leste do sul são negativos.

Figura 8 – (a) Ângulo zenital, inclinação, ângulo azimutal de superfície, e ângulo solar azimutal para uma superfície inclinada. (b) Vista do ângulo azimutal solar sobre um plano de coordenadas Norte-Sul



Fonte: Adaptado de Duffie e Beckman (2013).

A partir das relações de geométricas mostradas na Fig. 8 a irradiância extraterrestre pode ser calculada como (DUFFIE; BECKMAN, 2013):

$$G_0 = G_{SC} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) (\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta). \quad (1)$$

Onde $G_{SC} = 1367 \text{ W m}^{-2}$ é a constante solar e n é o dia juliano.

2.4 COMPONENTES DA RADIAÇÃO NO CÁLCULO DA RADIAÇÃO SOLAR ABSORVIDA POR UM COLETOR PLANO

A maior parte dos módulos solares são formados por painéis planos instalados com uma certa inclinação com relação à superfície horizontal, podendo ser idealizado como uma superfície inclinada. A estimativa da quantidade de radiação incidente sobre um painel inclinado depende do modelo de radiação utilizado. Hottel e Woertz (1942) sugeriram um

modelo de radiação, conhecido como modelo isotrópico, no qual a soma da radiação difusa vinda do céu e da radiação refletida no solo independe da direção e a radiação total sobre a superfície inclinada é dada pela soma da radiação direta, da radiação difusa e da radiação refletida (DUFFIE; BECKMAN, 2013). Por exemplo, a irradiação Solar horária sobre uma superfície inclinada pode ser estimada através da Eq. (2) (DUFFIE; BECKMAN, 2013):

$$I_T = I_{dir}R_{dir} + I_{dif} \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + I\rho_g \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right). \quad (2)$$

Onde R_{dir} é o fator geométrico que expressa a taxa entre a radiação direta sobre uma superfície inclinada para radiação direta sobre uma superfície horizontal, β é o ângulo de inclinação da superfície com relação à horizontal, ρ_g é o fator de reflexão difusa no solo da irradiação global horária (I). Finalmente, $(1 + \cos\beta)/2$ e $(1 - \cos\beta)/2$ representam os fatores de visão a partir do céu e do solo, respectivamente (HOTTEL; WOERTZ, 1942; LIU; JORDAN, 1963; DUFFIE; BECKMAN, 2013).

Multiplicando ambos os lados da Eq. (2) pelo produto entre a transmitância (τ) e absorvância (α) do painel, tem-se (DUFFIE; BECKMAN, 2013):

$$S = I_{dir}R_{dir}(\tau\alpha)_{dir} + I_{dif}(\tau\alpha)_{dif} \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + I\rho_g(\tau\alpha)_g \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right). \quad (3)$$

É importante ressaltar que caso, a integração da irradiância seja feita para o período diário a Eq. (3), assim como a Eq. (2), pode ser escrita como:

$$S = H_{dir}R_{dir}(\tau\alpha)_{dir} + H_{dif}(\tau\alpha)_{dif} \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + H\rho_g(\tau\alpha)_g \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right). \quad (4)$$

Onde H é a irradiação Solar diária.

A energia que será convertida nos painéis solares também dependem de outras variáveis meteorológicas tais como a velocidade do vento, a temperatura e a umidade. Todavia, a análise de como essas variáveis afetam a geração de energia elétrica nos painéis Solares está fora do escopo do presente trabalho. Por outro lado, a estimativa da radiação difusa implica diretamente na estimativa da geração de energia Solar, como pode ser visto nas Eqs. 3 e (4). Além disso, como a maior parte dos painéis solares são instalados na forma de superfícies planas inclinadas, somente a componente direta da radiação, que incide sobre a superfície inclinada, pode ser determinada diretamente utilizando trigonometria, sendo a informação da radiação difusa incidente desconhecida (RIDLEY; BOLAND; LAURET, 2010). A estimativa incorreta da radiação difusa pode levar a erros de até 8% na previsão de energia Solar gerada anualmente (HOFMANN; SECKMEYER, 2017).

2.5 MODELOS DE RADIAÇÃO DIFUSA

Apesar de ser muito importantes para projetos de instalação de empreendimentos solares bancos de dados com medidas de radiação direta e radiação difusa ainda são escassos, sendo que na maioria dos casos apenas a medida de radiação global é disponível (EL-SEBAIL; TRABEA, 2003; RIDLEY; BOLAND; LAURET, 2010; BAKIRCI, 2015; LEMOS et al., 2017, entre outros).

Nesse sentido, uma grandeza que pode ser obtida diretamente a partir da radiação global é o índice de transmissividade da atmosfera, ou índice de claridade da atmosfera, o qual é definido como a razão entre a irradiação global pela irradiação extraterrestre. O índice de claridade atmosférico pode ser calculado utilizando diferentes escalas de tempo, ou seja (DUFFIE; BECKMAN, 2013):

- Horário:

$$k_T = \frac{I}{I_0}; \quad (5)$$

- Diário:

$$K_T = \frac{H}{H_0}; \quad (6)$$

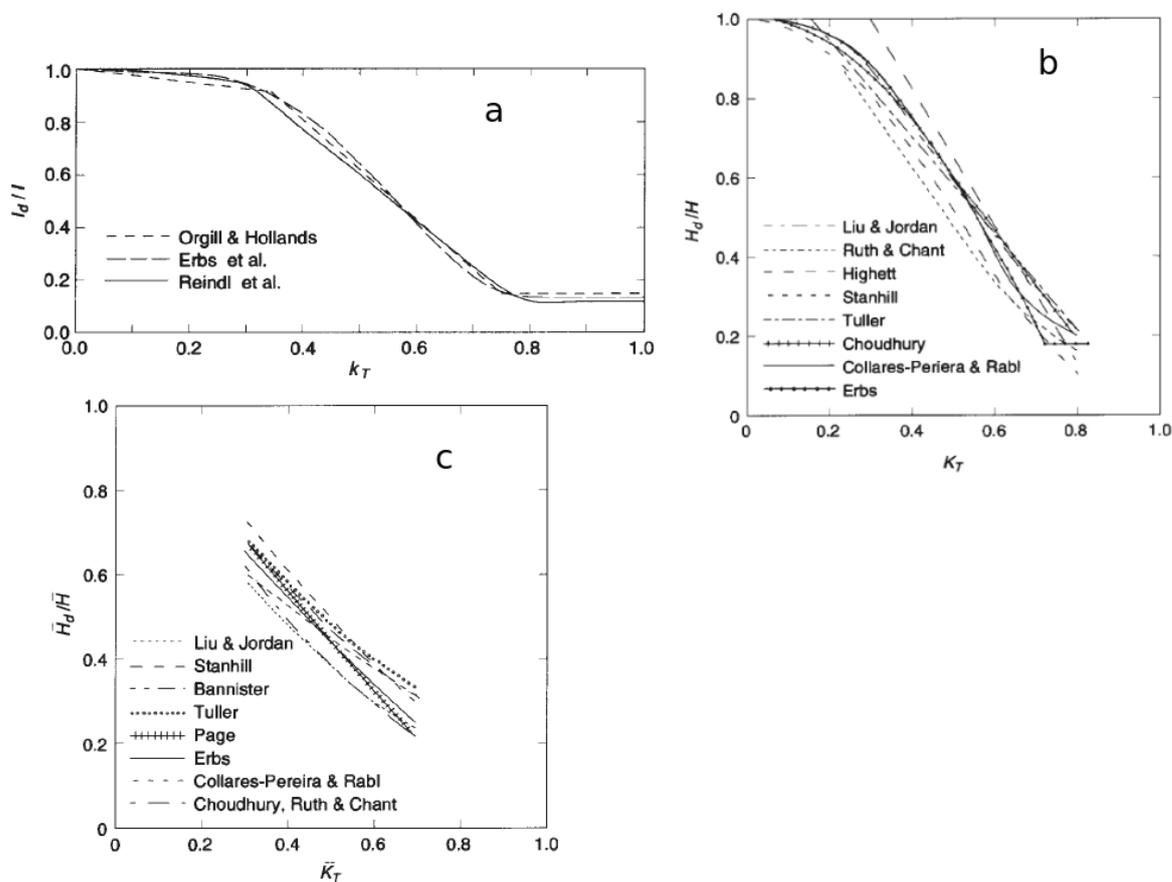
- Mensal:

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0}; \quad (7)$$

Onde I_0 e H_0 \bar{H}_0 , são as irradiações Solar extraterrestre horária, diária e mensal, respectivamente. É importante destacar que a distinção entre o índice de transmissividade da atmosfera calculado usando as irradiações horárias, diárias e mensal é feita pelo uso de letras minúsculas, maiúsculas e maiúsculas com a barra indicativa de média, respectivamente conforme notação utilizada por Duffie e Beckman (2013).

Liu e Jordan (1963) mostraram, utilizando dados observacionais coletados em Blue Hill, MA, Estados Unidos da América, entre setembro de 1952 e agosto de 1956, que a razão entre a radiação difusa e a radiação global, conhecida como fração difusa, possui correlação com o índice de claridade atmosférico. Diversos estudos após Liu e Jordan (1963) têm corroborado a relação entre a fração difusa e o índice de claridade atmosférico como mostram Duffie e Beckman (2013), (Fig. 9). A Fig. 9 mostra a dependência da fração difusa com o índice de claridade da atmosfera utilizando dados horários (Fig. 9a), diários (Fig. 9b) e médias mensais (Fig. 9c).

Figura 9 – Relações médias entre a fração difusa e o coeficiente de claridade atmosférico: horário (Fig. 9a); diário (Fig. 9b) e mensal (Fig. 9c).



Fonte: Adaptado de Duffie e Beckman (2013).

Nos últimos anos devido a escassez de dados de radiação difusa, as relações da fração difusa e coeficiente de claridade estão sendo utilizados para o aprimoramento de modelos empíricos de previsão da fração difusa (EL-SEBAIL; TRABEA, 2003; RIDLEY; BOLAND; LAURET, 2010; BAKIRCI, 2015; LEMOS et al., 2017; SONG et al., 2020). Spencer (1982) demonstrou, utilizando quatro diferentes métodos para estimar a irradiação difusa, que os modelos já utilizados em localidades do hemisfério norte, Estados Unidos e Europa, não apresentaram bom desempenho em estimar a radiação difusa em localidades da Austrália. Nesse sentido, Ridley, Boland e Lauret (2010) propuseram um modelo universal, conhecido como modelo BRL (Boland–Ridley–Lauret model), que consistem em um modelo múltiplo predictor logístico genérico que utiliza o ajuste de uma função para estimar a fração difusa em uma base de dados horária. Lemos et al. (2017) ajustaram os parâmetros do modelo BRL para o clima brasileiro, utilizando os bancos de dados das estações automáticas do INMET (dados de radiação global) e da rede SONDA (dados de radiação difusa).

Outra forma de estimar a fração difusa é a a utilização de modelos para estimar

a média mensal da fração difusa diária. A média mensal da fração difusa diária é definida como:

$$\bar{K} = \frac{\bar{H}_{dif}}{\bar{H}}. \quad (8)$$

Conforme mostrado na Fig. 9c a relação entre a média mensal da fração difusa diária (\bar{K}) e o índice de claridade atmosférico (K_T) é mais simples que a relação quando dados horários ou diários são utilizados. Dessa forma, os modelos para determinação da média mensal da fração difusa consistem em polinômios que geralmente são função do índice de claridade atmosférico (EL-SEBAI; TRABEA, 2003; BAKIRCI, 2015; SONG et al., 2020). El-Sebail e Trabea (2003) apresentam a comparação de diferentes modelos que utilizam diferentes variáveis para a determinação de \bar{K} , a média mensal do índice de claridade atmosférico e número de horas de sol na localidade. Tais modelos foram aplicados à dados observacionais de 4 localidades do Egito e os autores mostram que os modelos de segunda ordem que utilizam o número de horas de Sol como parâmetro principal de estimativa da média mensal da fração difusa obtêm os melhores resultados. Já Bakirci (2015) comparou 15 modelos para previsão da média mensal da fração difusa em diferentes localidades da Turquia. A partir da comparação entre os modelos Bakirci (2015) propõe uma nova classe de modelos que utiliza tanto o número de horas de Sol tanto o índice de claridade como variáveis na determinação de \bar{K} , mostrando que os modelos polinomiais com essa característica obtêm os menores erros com relação às observações. Song et al. (2020) comparam 46 modelos utilizando um banco de dados com 26 anos de medidas horárias de radiação global e difusa para as cidades Guangzhou, Shanghai, e Wuhan na China e também mostram que modelos polinomiais de terceira ordem que dependem tanto do índice de claridade da atmosfera quanto do número de horas de Sol possuem melhor performance. Além disso, Song et al. (2020) sugerem que tais modelos são capazes de realizar previsões confiáveis de radiação Solar difusa, mesmo em locais onde não há disponibilidade de dados observacionais. Uma outra alternativa para a ausência de dados observacionais é a utilização de dados de simulações numéricas de modelos meteorológicos como os dados de reanálise meteorológica (URRACA et al., 2018).

2.6 REANÁLISE

A Meteorologia é a ciências que estuda as condições atmosféricas através das leis da física clássica e técnicas matemáticas para compreender a dinâmica dos fenômenos atmosféricos e sua influência sobre a superfície terrestre (VIEIRA; PICULLI, 2009). No estudo da meteorologia, os conceitos de Tempo e Clima são distintos e estreitamente correlacionados. Tempo refere-se a condição atual da atmosfera; é o estado físico das condições atmosféricas momentâneas de um determinado local. Clima refere-se ao estudo médio do tempo por um determinado período de tempo numa determinada localidade (VIEIRA;

PICULLI, 2009) e (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2017).

A Climatologia -ciência que estuda o clima- baseia seus estudos a partir de elementos climáticos e fatores geográficos de um ambiente (VIEIRA; PICULLI, 2009). De acordo com Mendonça e Danni-Oliveira (2017) e VIEIRA e PICULLI (2009), a temperatura, a umidade e a pressão atmosférica são os principais elementos climáticos que interagem entre si e formam os diferentes climas. Esses elementos são grandezas meteorológicas que se manifestam de diferentes formas e variam no tempo e espaço influenciados por fatores geográficos como: a latitude, a altitude, a continentalidade, a vegetação, atividades humanas e outras.

O Rio Grande do Sul, por exemplo, de acordo com a Classificação Climática de Köppen é classificado como Temperado do tipo Subtropical. Quando comparado com outras regiões do Brasil, o Estado apresenta diferenças sazonais marcantes, principalmente em relação à temperatura. As temperaturas médias variam entre 15 e 18°C ao longo do ano e mínimas de até -10°C nos meses de inverno e máximas de 40°C durante o verão. A distribuição das chuvas pode ser considerada homogênea e é influenciada pelas massas de ar oceânicas que atingem a região. (Secretaria de Planejamento, Orçamento e Gestão-RS, 2019).

Previsões de tempo, estudo de climas e mudanças climáticas são realizadas através dos registros regulares e sistemáticos dos dados ou séries temporais dos elementos climáticos ou variáveis meteorológicas. Esses dados são usualmente adquiridos através de estações meteorológicas de superfície (MOREIRA et al., 2017). No entanto, muitas vezes, o monitoramento e consequente aquisição de dados são dificultados por questões financeiras, técnicas, de acesso, erros de coleta, entre outros. Nesses casos podem ser empregados outros recursos, isolados ou combinados, para aquisição de dados, como por exemplo, dados de satélites, sensoriamento remoto, reanálise meteorológica e outros (NÓBREGA; SOUZA; GALVÍNCIO, 2008) e (MOREIRA et al., 2017).

A reanálise meteorológica, por exemplo, consiste na utilização de conjuntos de dados observacionais (oriundos de satélites, boias, estações meteorológicas, radares, etc) de estados passados da atmosfera, os quais são distribuídos espacialmente de forma não homogênea. Tais dados são assimilados e utilizados como condições iniciais em um modelo global de previsão numérica de tempo e clima. Subsequentemente as saídas dos modelos, juntamente com as observações, são assimiladas para produzir análises e serem utilizadas em novas previsões de curto período (PARKER, 2016; FUJIWARA et al., 2017).

Dados de reanálise meteorológica já são amplamente utilizados em estudo para avaliação do potencial eólico bruto (ROSE; APT, 2015; OLAUSON; BERGKVIST, 2015; STÜKER et al., 2016, entre outros). Todavia, os dados de reanálise meteorológica também podem ser uma boa opção para estudos sobre radiação solar (URRACA et al., 2018). Urraca et al. (2018) avaliaram a evolução de diferentes reanálises meteorológicas na es-

timativa da irradiação global sobre diferentes localidades da Europa. Os resultados apresentados por Urraca et al. (2018) mostram principalmente a evolução da reanálise ERA5, frente a reanálises anteriores desenvolvidas pelo Centro Europeu de Previsão do Tempo (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - ECMWF).

2.6.1 Reanálise ERA5

O projeto “*ECMWF Re-Analysis*” (ERA) desenvolvido pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)* reúne dados de reanálise de uma grande quantidade de observações climatológicas a nível mundial. A reanálise meteorológica pode ser definida como um conjunto de dados em grade. Esses são obtidos através da combinação de aquisições de dados medidos por institutos de meteorologia e modelos físicos de circulação e previsão globais. O resultado dessa interação é um novo conjunto de dados, de alta resolução, que pode descrever de forma detalhada o comportamento climático de diferentes variáveis meteorológicas, atmosfera, superfície terrestre e oceanos (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - ECMWF, 2020).

O ERA5, por exemplo, faz parte desse projeto. O registro de dados assimilados pela ERA5 desde 1950 até os dias de hoje. As informações disponibilizadas ao usuários são estimativas horárias de muitas variáveis climatológicas atuante nas condições atmosféricas, terrestres e oceânicas. O ERA5 apresenta diversas melhorias quando comparado com o seu antecessor, o *ERA-Interim*, entre elas, podem ser citadas: resolução espacial horizontal de 31 km, com dados reunidos em uma grade dividida em 137 níveis, a partir da superfície terrestre até 80 km de altura da camada atmosférica. Os dados são atualizados de hora em hora e incluem estimativas de erros. Apresenta ainda, curvas sobre a evolução das emissões de gases agravantes do efeito estufa, temperatura superficial dos oceano e geleiras e erupções vulcânicas (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - ECMWF, 2020).

2.6.1.1 Estimava dos fluxos superficiais de radiação na reanálise ERA5

A reanálise ERA5 é produzida utilizando assimilação de dados em 4 dimensões (3 dimensões espaciais, mais o tempo), os quais são processados na versão de assimilação de dados CY41R2 do sistema de previsão integrado do modelo (ISF, do inglês Integrated System Forecast) do ECMWF (ECMWF, 2020). A condição de controno do ISF é o modelo de solo, ou um modelo oceânico de ondas, ao qual o modelo atmosférico é acoplado. O CY42R2 é um sistema global de ensemble que simula as incertezas geradas pelas condições iniciais e das parametrizações, usando um esquema de ensemble estocástico.

O esquema de radiação, utilizado pelo ISF, estima a radiação de onda curta e radiação de onda longa, através dos valores previsto de temperatura, umidade, cobertura de nuvens e das médias mensais dos principais gases da atmosfera (CO_2 , O_3 , CH_4 , N_2

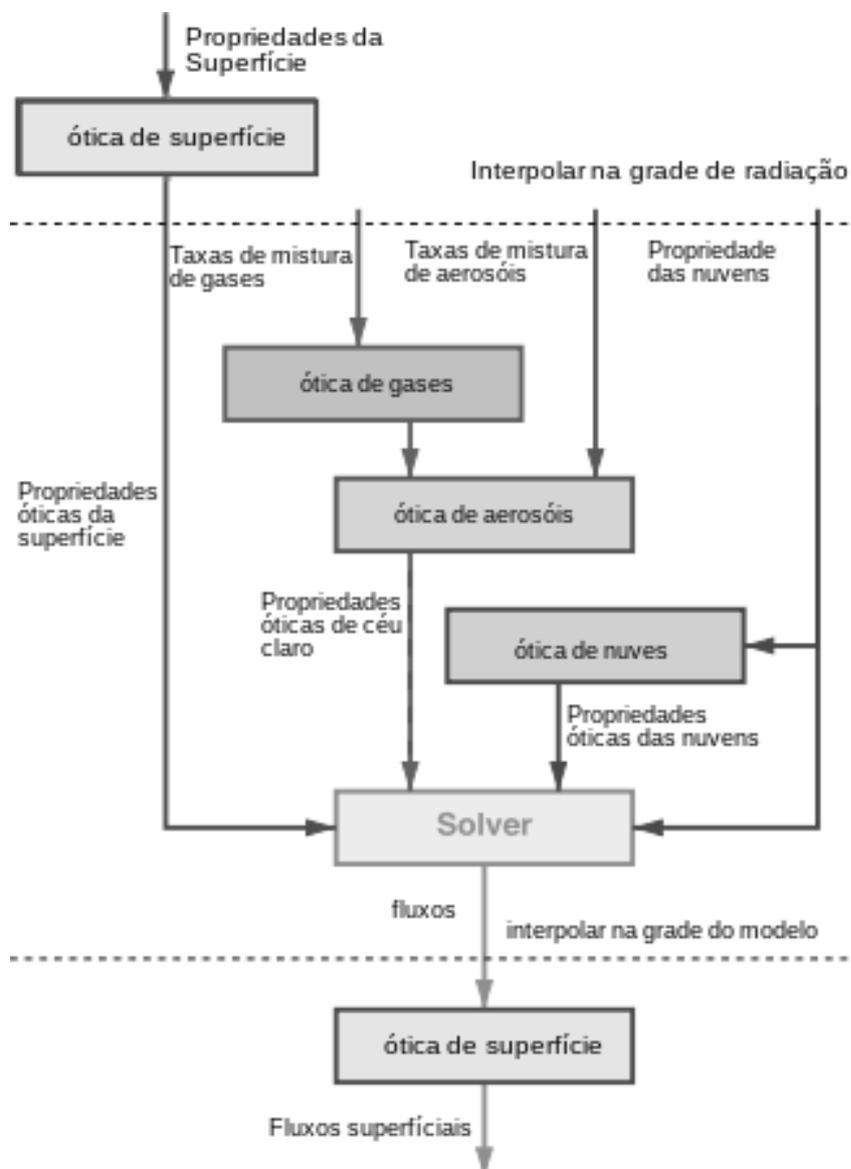
O, CFCl_3 and CF_2Cl_2) (HOGAN, 2017). O esquema de radiação utilizado pelo modelo do ECMWF é baseado no modelo de transferência rápida de radiação para modelos de circulação geral (RRTM-G, do inglês “Rapid Radiation Transfer Model”) (MLAWER et al., 1997).

As interações entre os esquemas de radiação e de nuvens do modelo é feita através do método McRad (MORCRETTE et al., 2008). Que utiliza os valores, obtidos através da parametrização de nuvens do modelo, de fração de nuvens e conteúdo de líquido, gelo e neve nas nuvens (HOGAN, 2017). A radiação de onda curta do modelo é calcula considerando a radiação solar como única fonte e sua variação em cada ponto de grade depende dos valores do ângulo zenital.

A solução do modelo de radiação, para se obter os fluxos superficiais de radiação, exige um elevado custo computacional, dessa forma, o calculo de todos os processos radiativos é feito ou em uma grade mais esparsa ou utilizando um passo de tempo maior.

O modelo McRad possui uma estrutura modular com cinco componentes independentes (Fig. 10). As influência das propriedades físicas da atmosfera (Gases, aerossóis, nuvens) e da superfície na radiação são calculadas, inicialmente, na grade do modelo de radiação, de forma independente. Os valores de radiação obtidos são posteriormente processados, na grade do modelo, pelo solver que calcula os valores dos fluxos superficiais de radiação.

Figura 10 – Estrutura do esquema de radiação utilizado no ISF do modelo do ECMWF.



Fonte: Adaptado de ECMWF (2020).

3 METODOLOGIA

3.1 DADOS DO INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET

A Nota Técnica nº 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET discorre sobre a Rede de Estações Meteorológicas Automáticas (EMA) do INMET, informando sobre os aspectos gerais de instalações, equipamentos, medições, aquisição e armazenamento de dados, como segue:

“Uma estação meteorológica automática (EMA) coleta, de minuto em minuto, as informações meteorológicas (temperatura, umidade, pressão atmosférica, precipitação, direção e velocidade dos ventos, radiação solar) representativas da área em que está localizada. A cada hora, estes dados são integralizados e disponibilizados para serem transmitidos, via satélite ou telefonia celular, para a sede do INMET, em Brasília. O conjunto dos dados recebidos é validado, através de um controle de qualidade e armazenado em um banco de dados” (INMET, 2011).

Ainda de acordo com a Nota Técnica, a instalação da base física de uma EMA deve ser realizada em uma área mínima de 14 m por 18 m, gramada, cercada e livre de obstruções naturais e prediais. Os sensores e instrumentos de medição devem ser fixados em um mastro metálico aterrado, protegido por pára-raios. Já os aparelhos para medição de chuva, como pluviômetros, de radiação solar, como piranômetros e a antena de comunicação não ficam acopladas ao mastro mas devem ser instaladas dentro da área cercada.

Para exemplificar as condições anteriormente citadas, a Figura 11 mostra o local instalação e a EMA, instalada próximo à cidade de Alegrete - RS, uma das utilizadas nesse trabalho.

A Tabela 1 reúne informações geográficas, o ano em que foram iniciados os registros meteorológicos das Estações Automáticas em cada cidade do território Gaúcho e o período de dados utilizados nesse estudo. O período escolhido para a realização das análises, foi determinado de modo a utilizar anos completos, a partir da instalação de cada torre.

Figura 11 – Estação Meteorológica Automática do Instituto Nacional de Meteorologia (EMA/INMET) instalada em Alegrete - RS



Fonte: INMET, 2010.

Tabela 1 – Posicionamento geográfico das Estações Automáticas (EMA) do INMET

Cidade	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Início de operação	Período
Alegrete	-29,70	-55,52	121	29/09/2006	2007 a 2014
Bagé	-31,34	-54,01	226	01/04/2007	2008 a 2014
Bento Gonçalves	-29,16	-51,53	623	12/01/2006	2006 a 2014
Caçapava do Sul	-30,54	-53,46	421	22/06/2006	2007 2014
Camaquã	-30,8	-51,83	92	12/12/2006	2006 a 2014
Canela	-29,36	-50,82	831	23/08/2008	2007 a 2014
Canguçu	-31,40	-52,7	447	24/01/2007	2008 a 2014
Cruz Alta	-28,60	-53,67	427	31/05/2007	2008 a 2014
Dom Pedrito	-31,00	-54,61	152	23/04/2010	2011 a 2014

Continua

Tabela 1 – *Continuação*

Erechim	-27,65	-52,3	777	25/11/2006	2007 a 2014
Frederico Westphalen	-27,39	-53,42	489	13/12/2007	2008 a 2014
Ibirubá	-28,65	-53,11	455	13/12/2012	2013 e 2014
Jaguarão	-32,53	-53,37	31	09/01/2007	2007 a 2014
Lagoa Vermelha	-28,22	-51,51	834	02/03/2007	2008 a 2014
Mostardas	-31,24	-50,9	4	12/03/2008	2009 a 2014
Palmeira das Missões	-27,92	-53,31	614	27/02/2008	2009 a 2014
Passo Fundo	-28,22	-52,4	681	27/11/2006	2007 a 2014
Porto Alegre	-30,05	-51,17	41	18/09/2000	2001 a 2014
Quaraí	-30,86	-56,43	113	17/10/2007	2008 a 2014
Rio Grande	-32,07	-52,16	5	06/09/2001	2002 a 2014
Rio Pardo	-29,87	-52,38	107	01/10/2006	2007 a 2014
Santa Maria	-29,72	-53,72	103	03/09/2001	2002 a 2014
Santa Rosa	-27,89	-54,48	273	15/11/2006	2007 a 2014
Santa Vitória do Palmar	-33,74	-53,37	7	15/03/2008	2009 a 2014
Santiago	-29,19	-54,88	390	05/02/2009	2010 a 2014
Santo Augusto	-27,85	-53,79	490	05/12/2001	2002 a 2014
São Borja	-28,65	-56,01	81	21/07/2007	2008 a 2014
São Gabriel	-30,34	-54,31	115	12/10/2007	2008 a 2014
São José dos Ausentes	-28,74	-50,05	1229	26/10/2006	2007 a 2014
São Luiz Gonzaga	-28,41	-54,96	246	25/07/2007	2008 a 2014

Continua

Tabela 1 – *Continuação*

Soledade	-28,85	-52,54	660	27/02/2008	2009 a 2014
Teutônia	-29,45	-51,82	80	04/10/2012	2013 a 2014
Torres	-29,35	-49,73	8	01/06/2006	2007 a 2017
Tramandaí	-30,01	-50,13	5	09/03/2008	2009 a 2014
Uruguiana	-29,83	-57,08	74	25/09/2006	2007 a 2014
Vacaria	-28,51	-50,88	970	26/04/2008	2009 a 2014

Conclusão

Fonte: INMET, 2019.

Foram utilizados dados de irradiação solar (I), observados em cada uma das estações de coleta, como fonte de comparação a dados de estimativas, e também, a dados fornecidos por modelos de reanálise meteorológicos. Cabe ressaltar que dados registrados pelas estações como nulos, erros ou suspeitos foram excluídos das análises.

3.2 DADOS DE REANÁLISE

Nesse estudo são utilizados dados da reanálise meteorológica ERA5 correspondentes ao mesmo período dos dados das estações automáticas do *INMET*. As variáveis horárias utilizadas são: irradiação global incidente (H), irradiação direta (H_n), irradiação extraterrestre (ou total radiação de onda curta no topo da Atmosfera) (H_0) e cobertura de nuvens.

Para a determinação da irradiação difusa (H_d), a partir dos dados fornecidos pela ERA5, foi realizada a subtração simples entre as radiações global e direta em superfícies, ou seja:

$$(H_d)_{ERA\ 5} = (H - H_n)_{ERA\ 5} \quad (9)$$

A unidade das componentes da radiação, fornecidas pela reanálise, é $W\ m^{-2}$, portanto todas as componentes foram convertidas para $W\ h\ m^{-2}$. A cobertura de nuvens é dada na forma de fração de nuvens, em escala de 0 (zero) a 1 (um), onde 0 representa céu totalmente claro, enquanto 1 representa o céu totalmente encoberto.

3.3 MODELOS PARA MÉDIA MENSAL DA FRAÇÃO DIFUSA DIÁRIA

A média mensal da fração difusa diária será estimada utilizando metodologia semelhante a Bakirci (2015) e Song et al. (2020), que incluem variáveis como o número diário de horas de sol, radiação global e radiação extraterrestre, fornecidas pela reanálise ERA5. A relação entre tais variáveis será estabelecida através da fração difusa diária \bar{K} , distri-

buída em grupos de polinômios que distinguem quanto ao grau e quanto a dependência de parâmetros altamente relevantes na estimativa da radiação difusa.

A fração difusa \bar{K} relaciona diretamente as radiações difusa e global através da razão entre as elas. Serão usados três grupos polinomiais distintos que alternam sua dependência entre o índice de claridade \bar{K}_T e o parâmetro n/N que inclui a quantidade efetiva de horas de sol. São eles:

- Grupo 1 - Grupo de polinômios onde a fração difusa \bar{K} é função somente do número de horas de sol possíveis (n/N):

$$\bar{K} = \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = f(n/N) \quad (10)$$

- Grupo 2 - Grupo de polinômios onde \bar{K} é função somente do índice de claridade (\bar{K}_T):

$$\bar{K} = \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = f(\bar{K}_T) \quad (11)$$

- Grupo 3 - Grupo de polinômios onde \bar{K} é função tanto índice de claridade (\bar{K}_T) quanto do número de horas de sol (n/N):

$$\bar{K} = \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = f(\bar{K}_T, n/N) \quad (12)$$

Onde:

- \bar{H}_d é a média diária da radiação difusa (W h m^{-2}).
- \bar{H} é a radiação global incidente (W h m^{-2}).
- N é o número máximo de horas de sol possíveis (astronômico).
- n é o número efetivo de horas de sol diário (brilho solar).
- \bar{K}_T é o índice de claridade.
- \bar{H}_0 é a radiação extraterrestre (W h m^{-2}).

Quanto ao grau, serão utilizados polinômios quadráticos e cúbicos, nos três grupos de dependência, determinando os coeficientes através de técnica de regressão não linear, a partir dos dados fornecidos pela ERA5. Dessa forma, cada grupo contará com dois polinômios, com objetivo de calibrá-los, para diferentes locais da Região Sul do Brasil, a partir da radiação difusa fornecida pelo modelo de reanálise.

A determinação do número máximo de horas de sol possível (N), para cada local, corresponde a duração astronômica do dia e foi encontrada através da metodologia descrita por Borges (1996), utilizando as coordenadas geográficas de cada local estudado,

declinação solar e dia juliano. A inclusão da cobertura de nuvens foi utilizada para estimar o número efetivo de horas de sol, ou brilho solar (n), diário, de forma que o somatório da fração de cobertura de nuvens horária seja subtraído do número máximo possível de horas de sol, ou seja:

$$n = N - \sum_{i=1}^N (\text{cobertura de nuvens}) \quad (13)$$

Assim, quando a cobertura de nuvens diária for muito baixa, $n \rightarrow N$, e o parâmetro $(n/N) \rightarrow 1$. Já caso a cobertura de nuvens seja alta, $n \rightarrow 0$ e a razão $(n/N) \rightarrow 0$. Dessa forma, os Grupos 1 e 3 de polinômios, são diretamente afetados pela cobertura de nuvens, através do parâmetro (n/N) nos termos de ordem superior (lineares, quadráticos e cúbicos). Agora, se por exemplo, $(n/N) = 0$, os termos de ordem superior terão contribuição nula e a radiação difusa será expressa apenas por uma constante proporcional à radiação global (estimando a fração difusa K). Já quando (n/N) possui variabilidade entre 0 e 1, os termos função desse parâmetro pesam de forma mais significativa, afim de caracterizar a contribuição da nebulosidade nas estimativas. O Grupo 2 é função apenas do índice de claridade (K_T), que não distingue a contribuição exclusiva da nebulosidade, e o quanto a atmosfera está "limpa". De maneira geral, a razão R_g/R_0 fornece um "saldo" que chega à superfície, independentemente das condições que ocasionaram.

As estimativas de K são diárias, devido a dependência do parâmetro (n/N) , nos Grupos 1 e 3. Já para a determinação a partir do Grupo 2, estas foram realizadas por hora e posteriormente obtida a média diária. Em todos os casos foram utilizados somente dados diurnos e os resultados, por vezes, também são apresentados na forma de média mensal, separados por ano de análise.

3.4 PARÂMETROS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS

Com objetivo de validar os dados fornecidos pela reanálise ERA5, será realizada uma análise comparativa utilizando dados medidos diretamente nas cidades do estado do Rio Grande do Sul, onde estações do INMET estão presentes. As séries temporais de radiação de global das duas fontes de dados foram analisadas. Para fim de quantificação de erro entre as mesmas, serão apresentadas na seção 4 séries temporais brutas, acompanhadas da diferença simples, definida pelo erro (ϵ_{abs}):

$$\epsilon_{abs} = (X_{esperado} - X_{aprox.}) \quad (14)$$

Como espera-se que a reanálise ERA5 reproduza o comportamento da radiação em superfície, o mais aproximado possível, definimos como variável esperada ($X_{esperado}$) a radiação horária medida pelo INMET (I_{INMET}), enquanto a radiação horária (I_{ERA5}), fornecida pela reanálise, é definida como o valor aproximado ($X_{aprox.}$). Após, será deter-

minada a diferença percentual ($\epsilon\%$) entre as variáveis (HENDRICK et al., 2011), que para nossa aplicação é definida como:

$$\epsilon\% = \left(\frac{(I_{INMET} - I_{ERA5})}{(I_{INMET} + I_{ERA5})/2} \right) * 100 \quad (15)$$

Também serão obtidas as correlações de *Pearson* entre a radiação global (I) medida diretamente na EMA/INMET e a fornecida pela ERA5. O coeficiente de correlação de *Pearson* (r_{XY}), entre duas variáveis X e Y , é definido pela razão entre sua covariância e o produto dos desvios padrões de cada uma das variáveis (CRESPO, 2017), como segue:

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (16)$$

desde que $\sigma_X \neq 0$ e $\sigma_Y \neq 0$.

Esse é um parâmetro adimensional, com valores situados entre -1,0 e 1,0, que reflete a intensidade de uma relação linear entre dois conjuntos de dados. De forma geral $r = 1$ significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis, desta forma se a variável X aumenta, a variável Y aumenta proporcionalmente. Se $r = -1$, então X e Y tem correlação negativa perfeita, enquanto X aumenta, Y diminui proporcionalmente. Quando $r = 0$ as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra. Consideraremos correlações maiores que 0,9, em magnitude, como correlação muito forte, entre 0,7 e 0,9, como forte e menores que 0,7 como moderada ou fraca (CRESPO, 2017).

Posteriormente, a correlação também será utilizada para comparar a fração difusa mensal \bar{K} determinada por diferentes modelos empíricos e os calculados diretamente pela reanálise ERA5.

Uma vez validados os dados disponíveis de reanálise, é necessário estabelecer a confiabilidade dos resultados obtidos a partir dos mesmos. Desta forma, serão utilizados os seguintes parâmetros: erro médio absoluto (do inglês: *mean absolute bias error - MABE*) e o erro quadrático médio (em inglês: *root mean square error - RMSE*), para testar a eficiência dos diferentes polinômios de estimativa da radiação difusa. Tais parâmetros são definidos por (CRESPO, 2017):

$$MABE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i| \quad (17)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

onde, x é o valor medido, y é valor calculado e n é o número total de observações. Tais parâmetros foram obtidos a partir das estimativas horárias da fração difusa mensal \bar{K} e apresentados na seção de 4.2.2.

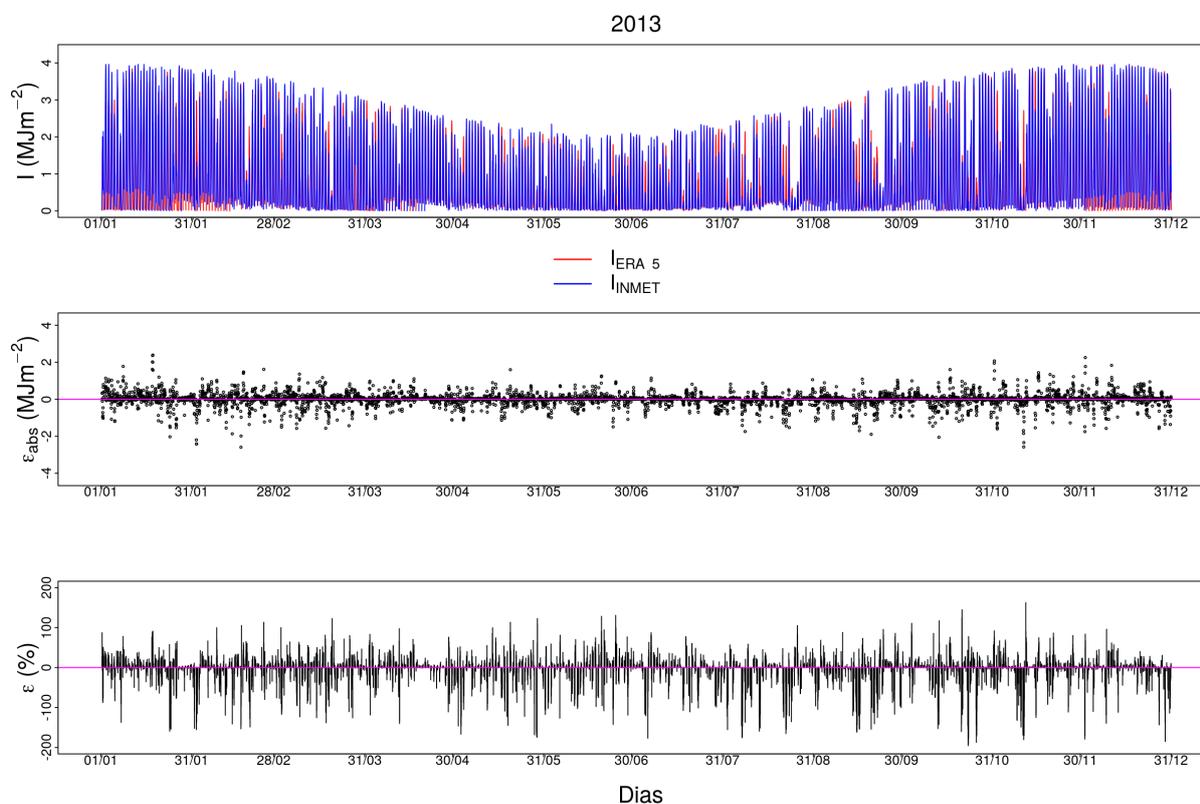
4 RESULTADOS

4.1 VALIDAÇÃO DA RADIAÇÃO GLOBAL

A série temporal da radiação horária (I) para a localidade de Mostardas (Figura 12), no ano de 2013, mostra que a variação anual é bem representada pela reanálise (barras vermelhas), de forma que percebe-se que nos períodos de inverno e primavera, a reanálise ERA5 traz valores superiores em comparação aos dados medidos na torre (barras azuis). Entretanto, também perceber-se que são em episódios (dias) de baixa incidência radiativa observada pelo INMET que há maior discrepância entre as variáveis, sendo que o modelo ERA5 passa a superestimar os valores de radiação global. Essa análise porém, somente será válida se tais episódios não forem devido à falhas nos sensores de medição e realmente estarem associados à nebulosidade ou episódios de precipitação. Para concluir com exatidão tais circunstâncias, um estudo mais aprofundado, utilizando séries temporais de precipitação se faz necessário.

A diferença simples ϵ_{abs} entre as variáveis, definida pela equação 14, na sua grande maioria mostra diferenças entre -2 e 2 M J m^{-2} , salvos alguns casos que excedem essas magnitudes. Nota-se, apesar da análise qualitativa da série de I anterior, que existe uma tendência de as maiores diferenças serem observadas nos períodos da primavera e verão. Apenas através diferença ϵ_{abs} não é possível estabelecer um padrão que defina a relação entre as magnitudes I_{INMET} e I_{ERA5} . Contudo, observando a série do erro percentual $\epsilon\%$ notamos que as maiores diferenças são predominantemente negativas, levando a conclusão que os grandes erros, entre as variáveis de radiação, são devido a superestimativa por parte da reanálise (ver eq. 15).

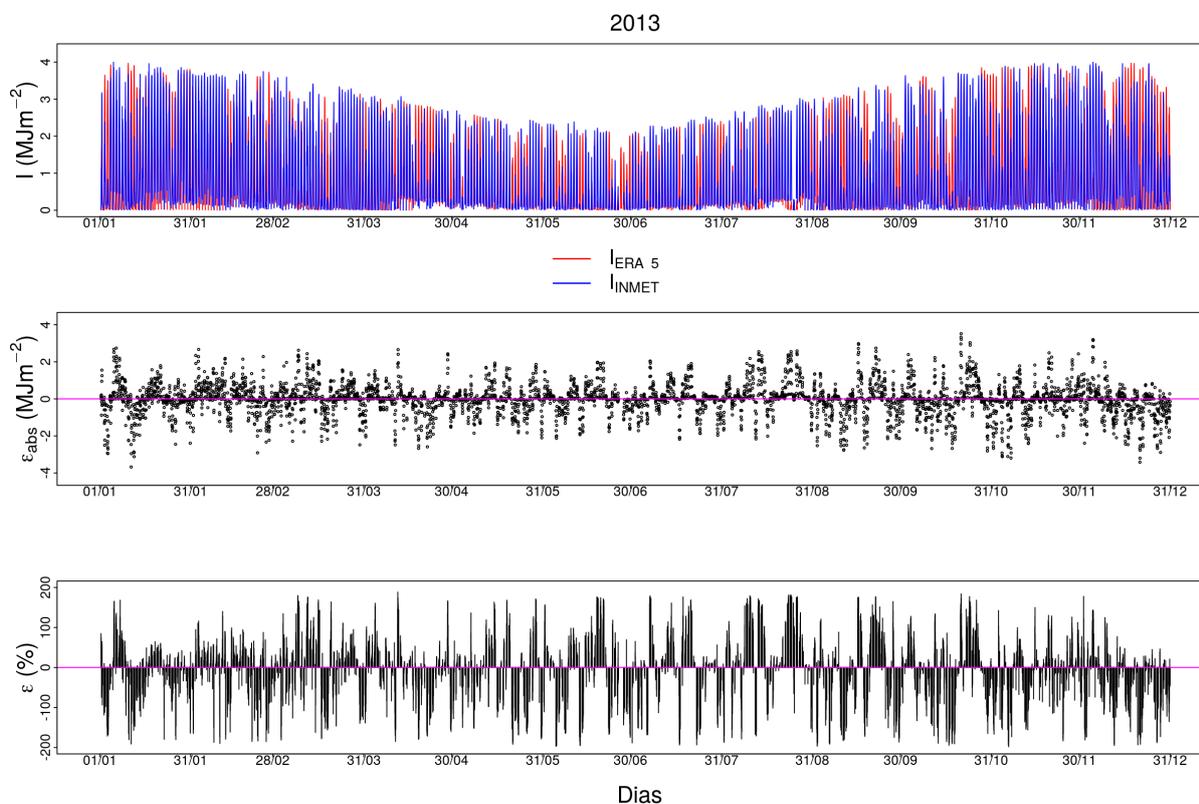
Figura 12 – Série temporal da radiação global horária I fornecida pelo INMET (linhas azuis) e pela reanálise ERA5 (linhas vermelhas), para Mostardas - RS (painel superior). Diferença entre I_{INMET} e I_{ERA5} (painel central) e a diferença percentual $\epsilon\%$ entre as mesmas (painel inferior).



Fonte: A autora.

A Figura 13 mostra o padrão sazonal da radiação global na cidade de Bento Gonçalves - RS. Por sua vez, percebe-se uma grande quantidade de divergência na magnitude das radiações, independentemente do período observado. Casos em que I_{INMET} apresenta valores baixos e I_{ERA5} traz valores bastante superiores, ocorrem durante todo o ano de 2013 (Figura 13 - painel superior). Tal fato fica mais evidente ao observarmos a diferença ϵ_{abs} e o erro percentual $\epsilon\%$ entre o valor observado e o modelado (painéis central e inferior, respectivamente). Diferenças entre $|2,5|$ e $|3|$ $M J m^{-2}$ se espalham por toda a série, sem um período predominante de ocorrência de grandes de ϵ_{abs} . Adicionalmente, a diferença percentual $\epsilon\%$ alcançou valores superiores a 150%, em módulo, de forma que não é possível estabelecer um padrão de superestimativa ou subestimativa por parte da modelagem, sem uma análise estatística mais aprofundada.

Figura 13 – Série temporal da radiação global horária I_{INMET} (linhas azuis) e I_{ERA5} (linhas vermelhas) para Bento Gonçalves - RS. Diferença entre as radiações são explanadas no painel central e a diferença percentual $\epsilon\%$, no painel inferior.



Fonte: A autora.

De maneira geral, o padrão sazonal da radiação global é bem representado pela reanálise ERA5, para ambos os locais e a magnitude da diferença variando localmente. Apesar de não coincidirem geograficamente nem em latitude, nem em longitude, a altitude pode ser um dos fator impactante que provoca os maiores erros em Bento Gonçalves, visto que está a 623 m do nível do mar (Mostardas está a 4 m). Fenômenos meteorológicos locais como por exemplo, a formação de nevoeiro, podem ser umas das causas de tais discrepâncias, entretanto, somente uma análise mais aprofundada e ampla (maior período de dados) acerca de tais fenômenos traria melhores conclusões.

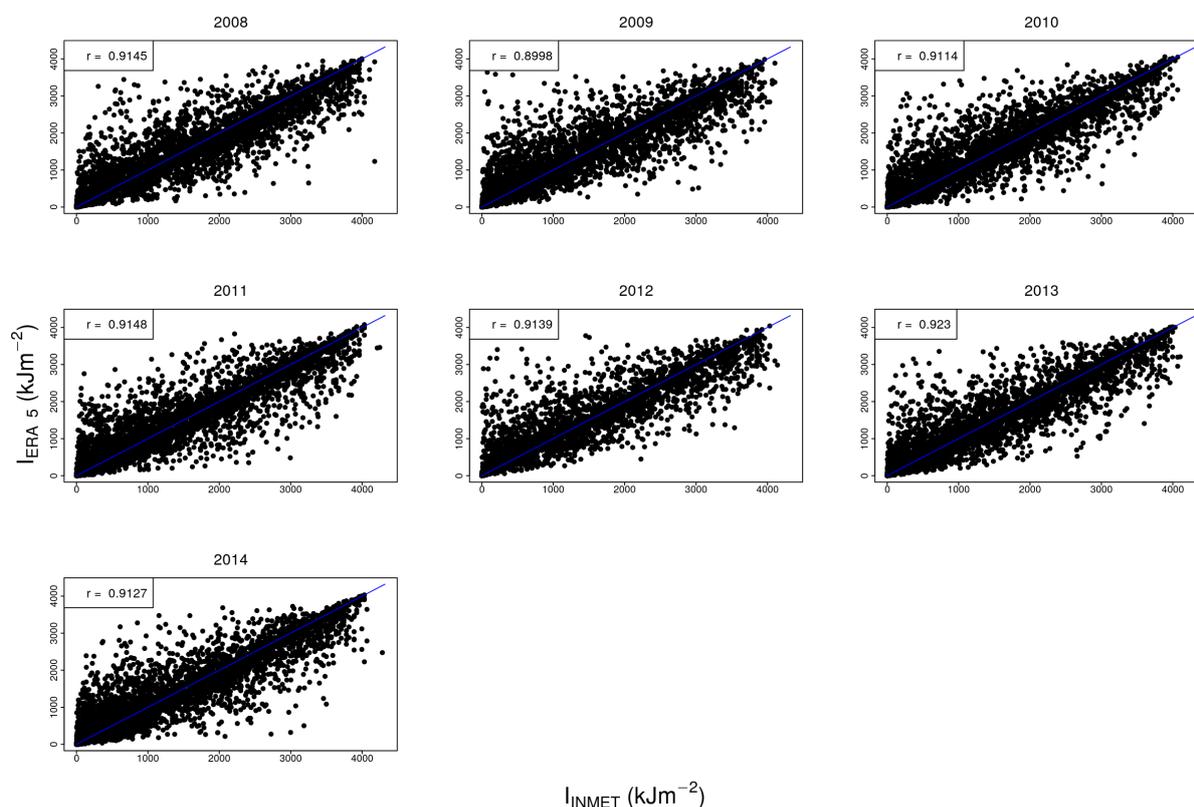
Para ampliar o comparativo entre as radiações medidas em superfície e as modeladas pela ERA5, são apresentados gráficos de dispersão anuais, para seis cidades do estado do Rio Grande do Sul, acompanhados do coeficiente de correlação entre as variáveis. Foram selecionadas localidades nos extremos geográficos do Estado, sendo mais ao norte representada por Frederico Westphalen e, mais ao sul, por Santa Vitória do Palmar. O local de menor longitude (mais à leste) está representado pela estação instalada em Tramandaí, enquanto o mais a oeste, será representada por Uruguaiana. Foram ainda selecionados outros dois locais, como objeto de estudo: Santa Maria, para representar a

região central do RS e Alegrete, de modo a incluir representatividade referente ao Pampa Gaúcho.

As figuras trazem as análises por ano completo de dados disponíveis, a partir da data de instalação da EMA/INMET até 2014, para cada local, com resolução horária (ver Tabela 1). Ainda, em cada quadro encontra-se, a correlação média anual, entre a radiação global medida na torre e a fornecida pela reanálise ERA5. Além disso, a linha azul em cada painel, representa a condição caso a correlação seja perfeita, ou seja, $r = 1$.

A Figura 14 mostra a evolução anual do comparativo entre os dados de radiação global entregue pelo INMET (abscissas) e pela ERA5 (ordenada), em kJ m^{-2} , para Frederico Westphalen ($-27,39^\circ$ de latitude; $-53,42^\circ$ de longitude). Pode-se perceber que para todos os anos analisados, a correlação é muito forte entre as grandezas (acima de 0,9), exceto para o ano de 2009 onde $r = 0,8998$. O ano em que as radiações das duas fontes estão melhor correlacionadas é 2013, quando $r = 0,923$. Em todos os casos, as magnitudes da radiação global estão de acordo com o esperado para a região do globo, nunca ultrapassando os 4400 kJ m^{-2} .

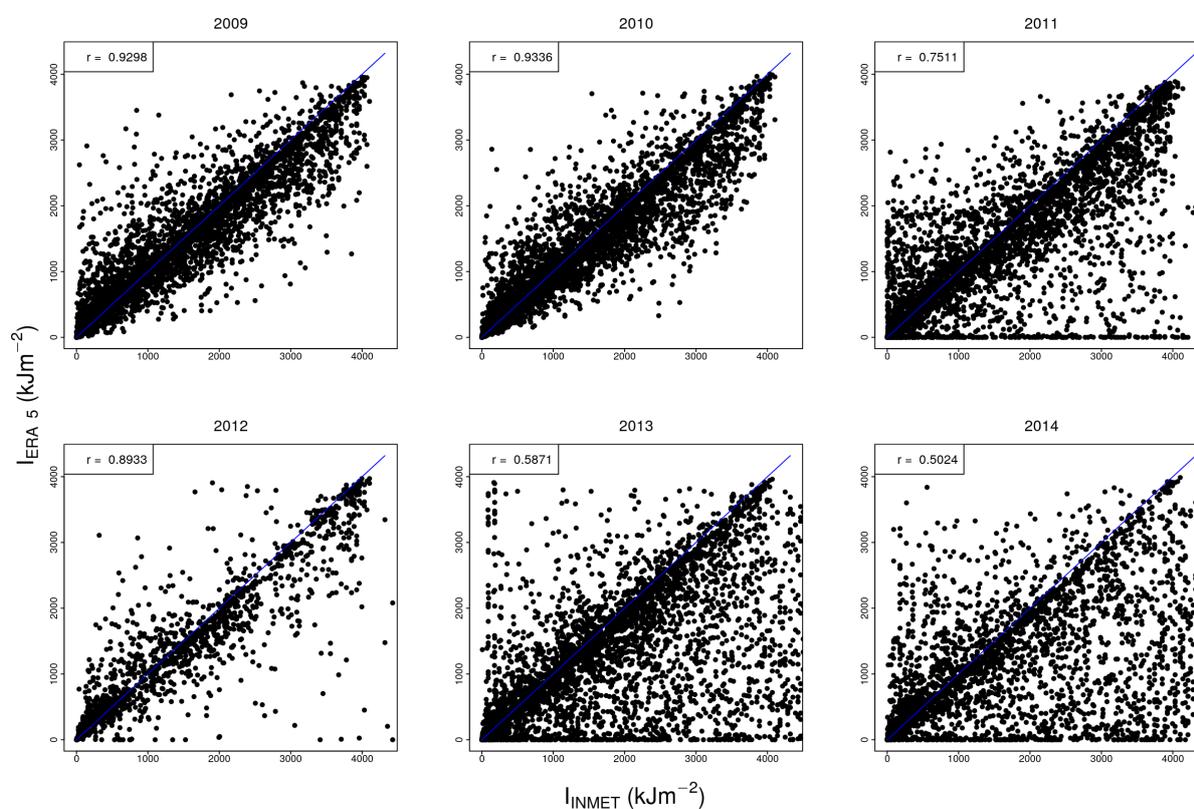
Figura 14 – Radiação global I , medidas nas estações automáticas do INMET comparadas, na forma de dispersão, à obtida através da reanálise ERA5, para Frederico Westphalen (27,39° S; 53,42° O). Os quadros representam cada ano completo de dados disponíveis, sendo estes, dados são horários. Para cada ano, a correlação de Pearson entre as variáveis está disponível no canto superior esquerdo.



Fonte: A autora.

O comparativo entre a radiação global, no extremo sul Gaúcho, está denotado por meio de dados da localidade de Santa Vitória do Palmar (-33,74° de latitude; -53,37° de longitude), e exposto através da Figura 15. Podemos identificar uma forte correlação entre as variáveis para os anos de 2009 e 2010 ($r = 0,9298$ e $r = 0,9336$, respectivamente) e o comportamento, em termos de magnitude de I , se mantém similar. A partir de 2011, entretanto, percebe-se uma discrepância entre o valor medido localmente e o estimado pela reanálise. A grande dispersão, principalmente para os anos de 2013 e 2014, onde a reanálise ERA5 fornece valores de I muito abaixo dos esperados, faz com que a correlação entre as grandezas seja fraca, não ultrapassando 0,6. Em particular, o painel referente ao ano de 2012, mostra um coeficiente de correlação forte ($r = 0,8933$) mas, por sua vez, é clara a ausência da totalidade de dados horários, provavelmente ocasionada pela falha de medições na estação EMA/INMET.

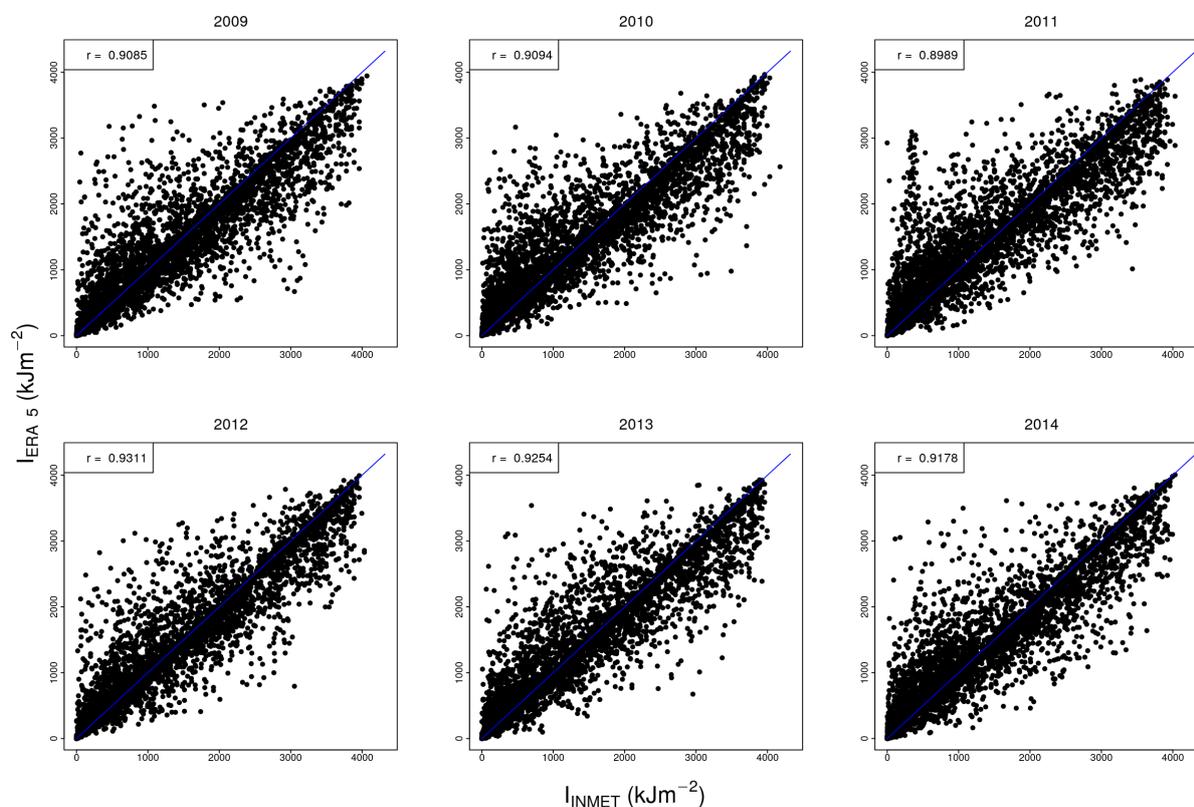
Figura 15 – Dispersão dos dados de radiação global, dos anos completos, disponíveis para Santa Vitória do Palmar (33,74° S; 53,37° O).



Fonte: A autora.

A Figura 16 traz o comparativo entre as radiações alvo de estudo, para a cidade de Tramandaí (30,01° de latitude; 50,13° de longitude), localizada no litoral do RS. Com exceção do observado para o ano de 2011 ($r = 0,8989$), todos os demais apresentam correlação muito forte entre as variáveis, sendo que o melhor índice é encontrado para o ano de 2011, com $r = 0,9311$. Mesmo para o comparativo com menor correlação (2011), é possível identificar que o índice não alcança maiores valores, devido a uma discrepância na faixa inicial, onde os valores de radiação global do INMET apresentam magnitudes entre 0 e 720 kJ m^{-2} , enquanto a reanálise fornece magnitudes da ordem entre 1440 e 2800 kJ m^{-2} .

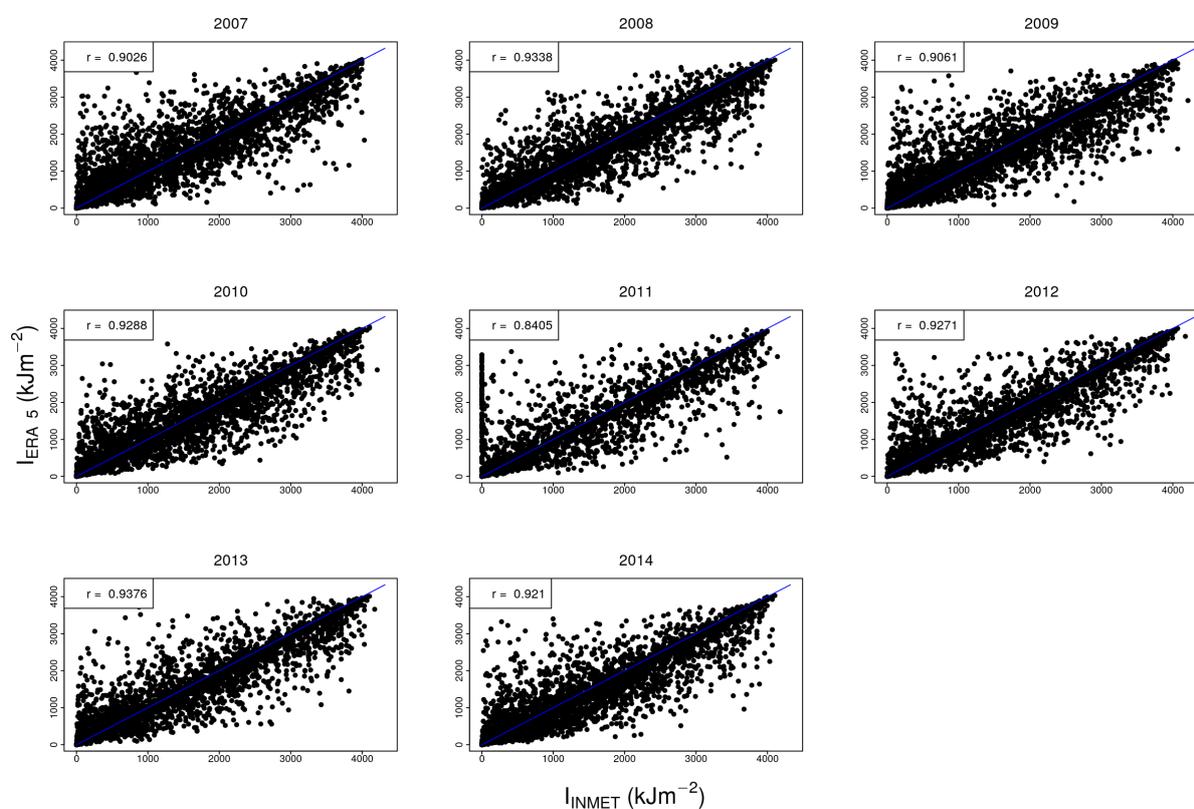
Figura 16 – Comparativo entre a radiação global medida pelo INMET e fornecida pela ERA5, para Tramandaí (30,01° S; 50,13° O), com dados horários entre os anos de 2009 e 2014. O coeficiente de correlação entre as variáveis está disponível em cada quadro.



Fonte: A autora.

A estação do INMET de Uruguaiana (-29,83° de latitude; -57,08° de longitude) é a mais ocidental encontrada no estado do Rio Grande do Sul. A radiação global medida por essa estação, comparada à fornecida pela ERA5, está exposta na Figura 17. De modo geral, para os 8 anos analisados, existe forte correlação e acordo quanto a magnitude da radiação global das duas fontes (nunca menores que 0,9). Nota-se também, que para o ano de 2011, existe uma falha, na faixa inicial, fazendo com que a correlação para o mesmo seja da ordem de 0,84. Essa falha, provavelmente, se deu junto aos dados medidos diretamente (EMA/INMET), com uma série de valores próximos a zero.

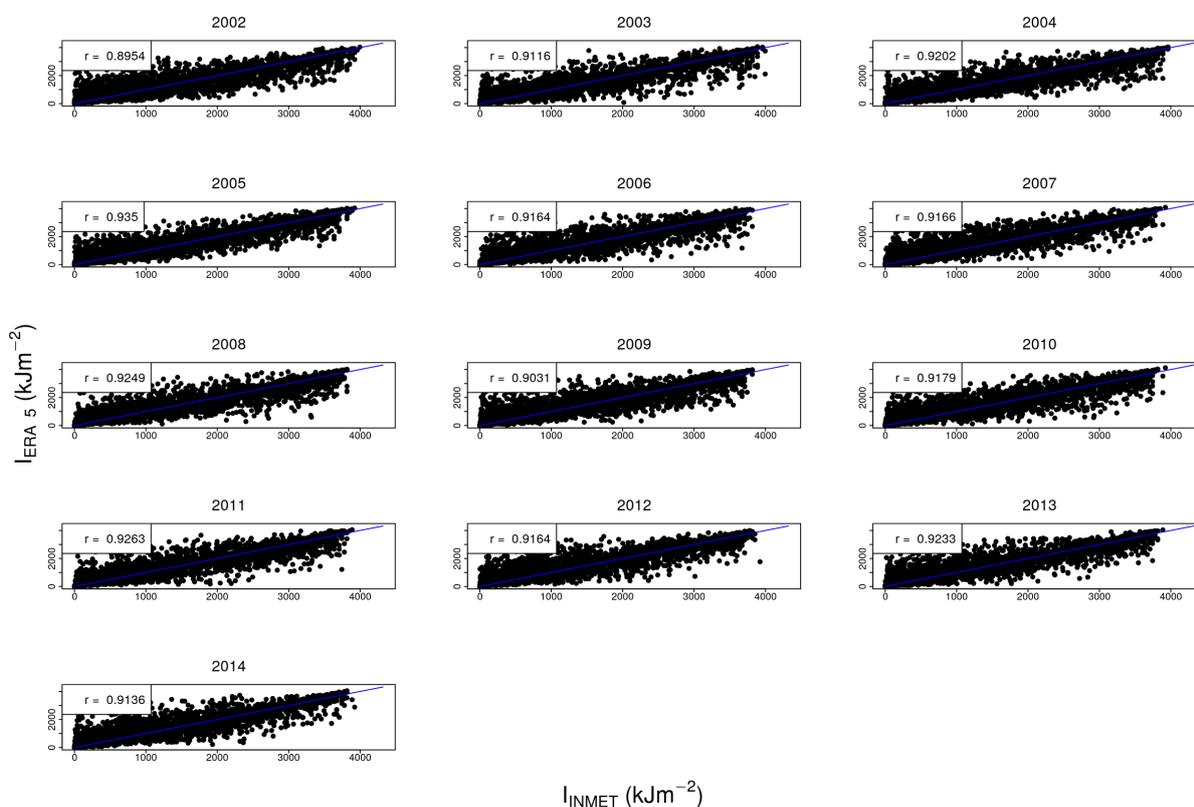
Figura 17 – Comparativo entre as radiações globais medidas pelo INMET e pela ERA5, Uruguiana (29,83° S; 57,08° O).



Fonte: A autora.

A cidade de Santa Maria, localizada no centro do estado, é dentre as localidades selecionadas, aquela que contém maior conjunto de dados a serem analisados (Tabela 1). A Figura 18 mostra que, em 12 dos 13 anos, a correlação entre \bar{I} medida *in situ* e a obtida através de reanálise meteorológica é considerada muito forte ($r > 0,9$). Mesmo a exceção (ano de 2002) a correlação média entre elas, é considerada forte, alcançando $r = 0,8954$. Quanto à magnitude, não se percebe grande discrepância, e ambas dispersam próximas à linha de tendência (linha azul). A maior correlação ocorreu para o ano de 2005 e vale 0,935.

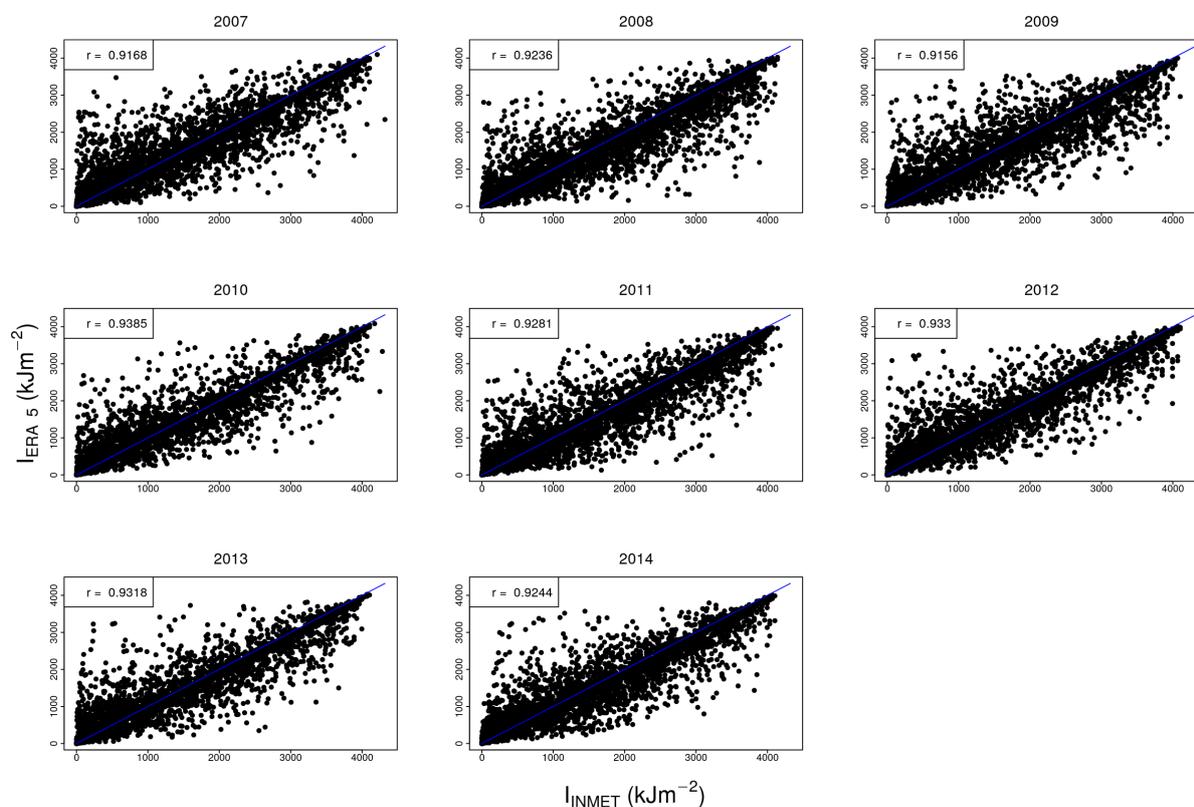
Figura 18 – I medida na EMA/INMET, na cidade de Santa Maria (29,72° S; 53,72° O), comparada à I da reanálise ERA5. Os quadros representam cada ano completo de dados disponíveis, sendo estes, dados são horários e as correlações são mostradas no canto superior esquerdo.



Fonte: A autora.

Em complemento às cidades selecionadas devido suas localizações geográficas (norte, sul, leste, oeste e centro), também foi escolhida para análise a estação do INMET em Alegrete - RS. A rigor a EMA/INMET está localizada a cerca de 35 km da cidade, no interior de um município vizinho (está instalada no Instituto Federal Farroupilha - Campus Alegrete - IFFar/Alegrete, interior do município de Manoel Viana - RS, -29,70° latitude; -55,52° de longitude), mas é referida como pertencente à ela. A Figura 19 mostra o comparativo entre a radiação global da estação e a da reanálise. São oito anos completos, nos quais a correlação é muito forte entre as variáveis ($r > 0,9$). Dessa forma, notamos que utilização da I fornecida pela reanálise, no ponto de grade mais próximo da estação, é satisfatória, e condiz com o valor medido diretamente.

Figura 19 – Radiação global (I) da EMA/INMET comparada à radiação global fornecida pela reanálise ERA5, para Alegrete - RS (29,70° S; 55,52° O). Todos os anos apresentaram correlação muito forte, com $r > 0,9$ (ver canto superior esquerdo de cada quadro).



Fonte: A autora.

Adicionalmente, o presente estudo validou os dados de radiação da reanálise ERA5 para todas estações automáticas do INMET no RS. A Tabela 2 apresenta quanto a radiação global (I) do INMET está correlacionada com a da reanálise ERA5, em média, para todo o RS, considerando como nos estudo de caso, somente anos completos de dados.

Tabela 2 – Médias das correlações (\bar{r}) para a Radiação global (I) entre a medida em superfície (I_{INMET}) e a apresentada pela reanálise (I_{ERA5}).

Cidade	Anos completos registrados	Média das Correlações
Alegrete	2007 a 2014	0,9302
Bagé	2008 a 2014	0,9237
Bento Gonçalves	2006 a 2014	0,6470
Caçapava do Sul	2007 a 2014	0,9205
Camaquã	2006 a 2014	0,9094
Canela	2007 a 2014	0,9017

Continua

Tabela 2 – *Continuação*

Canguçu	2008 a 2014	0,9120
Cruz Alta	2008 a 2014	0,8690
Dom Pedrito	2011 a 2014	0,9249
Erechim	2007 a 2014	0,9058
Frederico Westphalen	2008 a 2014	0,9129
Ibirubá	2013 a 2014	0,9115
Jaguarão	2007 a 2014	0,9247
Lagoa Vermelha	2008 a 2014	0,9066
Mostardas	2009 a 2014	0,9304
Palmeira das Missões	2009 a 2014	0,8693
Passo Fundo	2007 a 2014	0,8952
Porto Alegre	2001 a 2014	0,9120
Quaraí	2008 a 2014	0,9244
Rio Grande	2002 a 2014	0,9202
Rio Pardo	2007 a 2014	0,9172
Santa Maria	2002 a 2014	0,9170
Santa Rosa	2007 a 2014	0,9150
Santa Vitória do Palmar	2009 a 2014	0,7662
Santiago	2010 a 2014	0,9263
Santo Augusto	2002 a 2014	0,9103
São Borja	2008 a 2014	0,9173
São Gabriel	2008 a 2014	0,9155
São José dos Ausentes	2007 a 2014	0,6531
São Luiz Gonzaga	2008 a 2014	0,9132
Soledade	2009 a 2014	0,8917
Teutônia	2013 a 2014	0,9139
Torres	2007 a 2014	0,9064
Tramandaí	2009 a 2014	0,9152
Uruguaiana	2007 a 2014	0,9122
Vacaria	2009 a 2014	0,9042

Conclusão

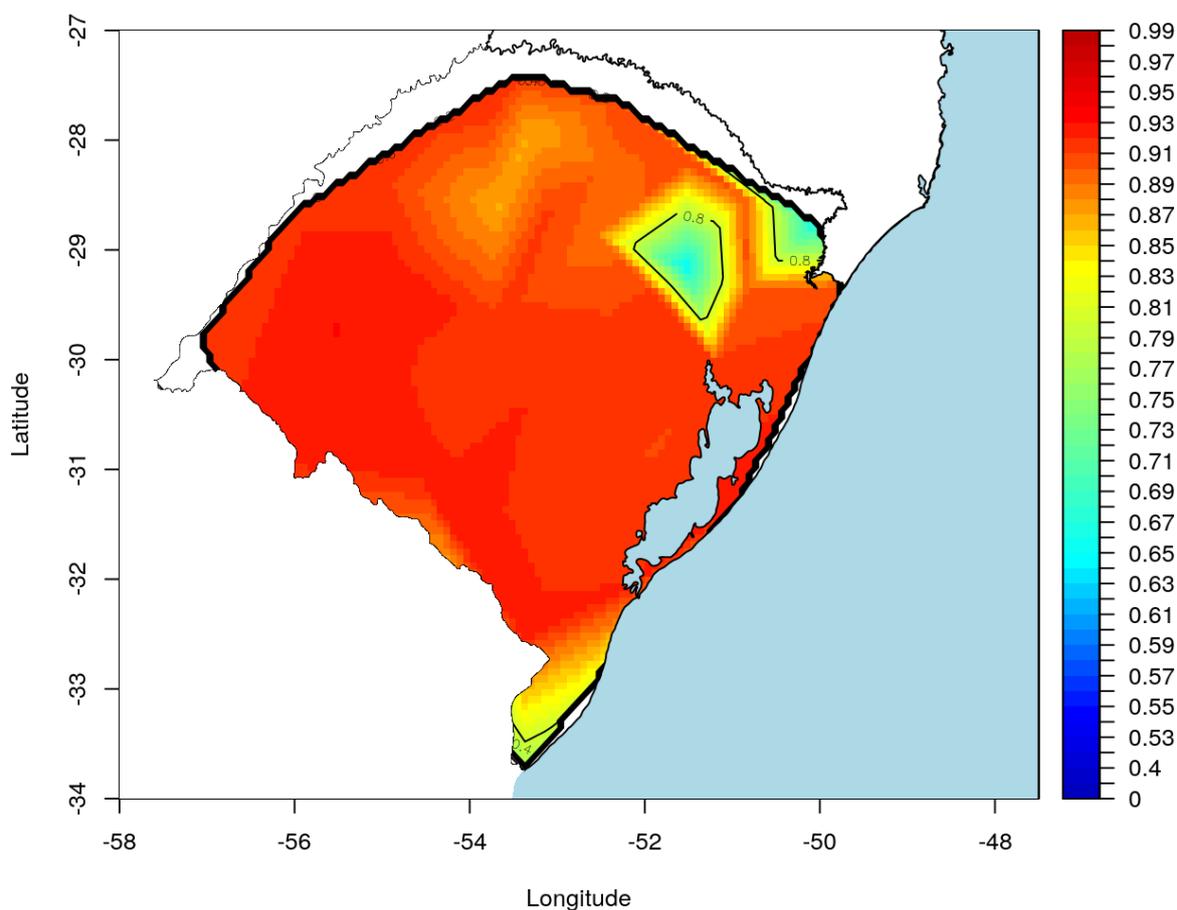
Fonte: A autora.

A partir dos resultados da Tabela 2 pode-se traçar um mapa de correlações dos diferentes locais, apesar desses possuírem diferentes períodos de dados (ver Tabela 1), para o estado do Rio Grande do Sul. Ainda de acordo com a Tabela 2 observa-se que, a

maior parte das cidades apresentaram médias de correlações bastante altas. Do total, 29 cidades obtiveram médias acima de 0,9. Dessas, destacam-se Alegrete e Mostardas, com $r = 0,9302$ e $r = 0,9304$, respectivamente. Por outro lado, pôde-se também constatar que 7 cidades não obtiveram médias acima de 0,90. Dessas, Bento Gonçalves e São José do Ausentes atingiram médias de $r = 0,6470$ e $r = 0,6531$ e podem ser consideradas como correlações do tipo moderada.

Considerando as médias da Tabela 2 e as informações geográficas da Tabela 1, elaborou-se a Figura 20 com objetivo de visualizar como ocorre a distribuição das médias de correlações para o estado do Rio Grande do Sul.

Figura 20 – Distribuição das correlações médias da radiação global do INMET *versus* ERA5, para as localidades e períodos descritos na Tabela 2 para o Rio Grande do Sul.



Fonte: A autora.

No mapa da Figura 20 o estado foi orientado pelas coordenadas longitude (eixo x) e latitude (eixo y). À direita do mapa encontra-se uma escala de cores, na qual, cada cor corresponde à um valor médio de correlação. Essa escala inicia em zero (azul escuro) e estende-se até 0,99 (vermelho escuro).

Considerando as observações da equação 16, constatou-se que em 80,55% das cidades do RS estudadas, para seus respectivos períodos, o coeficiente de correlação encontra-se acima de 0,90. Isso indica a predominância de correlações muito fortes entre uma variável medida localmente (EMA/INMET), em tempo real e outra disponível remotamente, a partir de modelo (nesse caso da reanálise ERA5).

A existência de uma ampla concordância, no quesito magnitude, e a análise da correlação entre a radiação global estimada pela ERA5 e a observada *in situ* indica que a utilização dessa variável e demais produtos fornecidos por tal modelo de reanálise, é uma alternativa tanto para lacunas temporais de dados, nos locais onde há medição local, quanto para locais onde não há monitoramento contínuo através de medições diretas.

4.2 ESTIMATIVA PARA A RADIAÇÃO DIFUSA

A correta determinação da radiação difusa, a partir de dados coletados pode, por vezes, se tornar inacessível devido a ausência de medições em todo um território alvo de estudo. Tal fato, pode ser contornado através da utilização de dados de reanálise, quando tratamos de eventos ou condições passadas. Assim, uma vez desejado a estimativa futura da radiação difusa, em determinada localidade, devemos obtê-la a partir de um método confiável e que respeite as características locais que afetam essa estimativa. Estabelecer um modelo, capaz de reproduzir com eficiência, tais características e assim estimar a radiação difusa é o objetivo dessa seção.

Será utilizada uma metodologia semelhante a empregada por estudo anteriores (EL-SEBAIL; TRABEA, 2003; BAKIRCI, 2015; SONG et al., 2020), de forma que, a média mensal da fração difusa diária \bar{K} será determinada, representando a relação entre a irradiação difusa diária e a irradiação global diária ($\bar{K} = \bar{H}_d/\bar{H}$). A definição de modelos empíricos, aqui representados por polinômios de diferentes graus e em função de diferentes parâmetros (n/N e \bar{K}_T , descritos na seção 3.3), que afetam diretamente na determinação da radiação difusa, será a ferramenta utilizada. Um comparativo entre os polinômios encontrados e o resultado obtido a partir da reanálise ERA5 será investigado, para os mesmos locais utilizados na validação da reanálise (seção 4.1), com objetivo de avaliar a eficiência dos mesmos.

4.2.1 Determinação da média mensal da fração difusa diária \bar{K}

A calibração de dois polinômios, um quadrático e um cúbico, de maneira que a média mensal da fração difusa diária \bar{K} seja estimado para 6 locais distintos no Rio Grande do Sul, em função somente de n/N (Grupo 1), somente de \bar{K}_T (Grupo 2) e em função de ambos (Grupo 3), será a seguir apresentada. Para cada ano de dados disponíveis, foram determinados os coeficientes que compõem cada polinômio, de maneira que as formas polinomiais finais de estimativa de \bar{K} , resultam da média aritmética desses coeficientes.

Os resultados para \overline{K} são apresentados através de médias mensais, comparando cada polinômio calibrado ao resultado encontrado a partir de dados do modelo de reanálise meteorológica ERA5, acompanhados do coeficiente de correlação entre eles.

A fração difusa diária oriunda da reanálise ERA5 foi definida por:

$$K_{ERA5} = \frac{(H_d)_{ERA5}}{(H)_{ERA5}} \quad (19)$$

Onde:

- $(H_d)_{ERA5}$ é irradiação difusa diária definida Equação 9 (Wh m^{-2}).
- $(H)_{ERA5}$ é a irradiação global diária fornecida pela reanálise (Wh m^{-2}).

Foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson, onde r_{GQ} representa a correlação entre o polinômio quadrático (linha vermelha) e o valor calculado a partir do ERA5 (linha preta) e r_{GC} representa a correlação entre o polinômio cúbico (linha azul) e o ERA5. O índice G alterna entre os Grupos 1, 2 e 3 de polinômios. Nos painéis, a observação através do ERA5 (Equação 19) permanece inalterada, havendo variação somente entre os Grupos e entre o grau dos polinômios, na apresentação dos resultados.

4.2.1.1 Frederico Westphalen

As equações 20 e 21 mostram a média mensal fração difusa diária calibrada a partir do parâmetro n/N através de um polinômio quadrático e outro cúbico, respectivamente, para a cidade de Frederico Westphalen, de maneira que o resultado é apresentado na Figura 21. De forma geral as estimativas geradas pelo Grupo 1 de polinômios (Figura 21), tanto quadrático quanto cúbico, estão bem correlacionadas como o expresso diretamente pela reanálise. Os anos com menores correlação foram 2010, onde $r_{1Q} = 0,8509$ e $r_{1C} = 0,845$ e 2014, onde $r_{1Q} = 0,8502$ e $r_{1C} = 0,8587$. Para os demais anos analisados as correlações são maiores que 0,9.

Quanto a magnitude, o valor de \overline{K} é superestimado pelos polinômios com maior evidência, nos primeiros 3 meses de 2010 e 2012, quando alcançam valores em torno de $\overline{K} \approx 0,5$ (2010) e $\overline{K} \approx 0,4$ (2012). Há ainda o mês de outubro de 2014, onde os polinômios estima valores de \overline{K} aproximados de 0,5, enquanto o ERA5 mostra valores em torno de 0,4. Por outro lado, os anos de 2009 e 2014 mostra que existe certa discrepância, com os polinômios subestimando a magnitude de \overline{K} . Em 2009, tal fato acontece para o meses de julho, agosto e setembro, quando os dados do ERA5, fornecem $\overline{K} > 0,6$, enquanto os calibrados não alcançam tal valores. Já para 2014, maio, junho e julho são os meses em que há situação semelhante à anterior. Ademais, a variabilidade sazonal, foi acompanhada pelos modelos quadrático e cúbico, em todos os anos.

- Grupo 1 - Grupo de polinômios onde \overline{K} é função do número de horas de sol possíveis (n/N):

$$\bar{K} = 0,7395 - 1,0532 \left(\frac{n}{N}\right) + 0,5665 \left(\frac{n}{N}\right)^2 \quad (20)$$

$$\bar{K} = 0,7421 - 1,3111 \left(\frac{n}{N}\right) + 1,3707 \left(\frac{n}{N}\right)^2 - 0,5705 \left(\frac{n}{N}\right)^3 \quad (21)$$

- Grupo 2 - \bar{K} em função do índice de claridade (\bar{K}_T):

$$\bar{K} = 1,1290 - 1,4898(\bar{K}_T) - 0,1718(\bar{K}_T)^2 \quad (22)$$

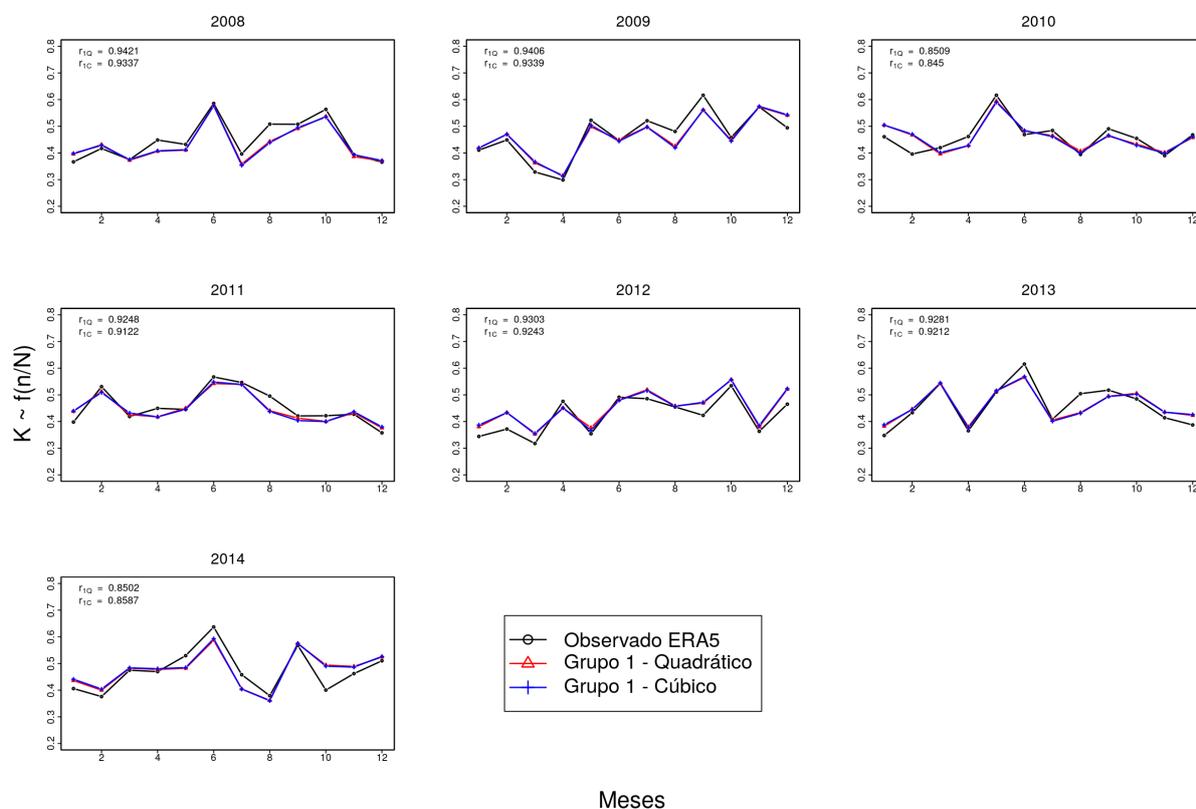
$$\bar{K} = 0,9996 - 0,1447(\bar{K}_T) - 3,6122(\bar{K}_T)^2 + 3,1347(\bar{K}_T)^3 \quad (23)$$

- Grupo 3 - \bar{K} em função do índice de claridade (\bar{K}_T) e do número de horas de sol possíveis (n/N):

$$\bar{K} = 1,0571 - 1,1009(\bar{K}_T) + 0,0831(\bar{K}_T)^2 - 0,4287 \left(\frac{n}{N}\right) - 0,2995 \left(\frac{n}{N}\right)^2 \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \bar{K} = & 0,9988 - 0,4841(\bar{K}_T) - 1,7007(\bar{K}_T)^2 + 1,5184(\bar{K}_T)^3 \\ & - 0,4808 \left(\frac{n}{N}\right) + 0,5025 \left(\frac{n}{N}\right)^2 - 0,1634 \left(\frac{n}{N}\right)^3 \end{aligned} \quad (25)$$

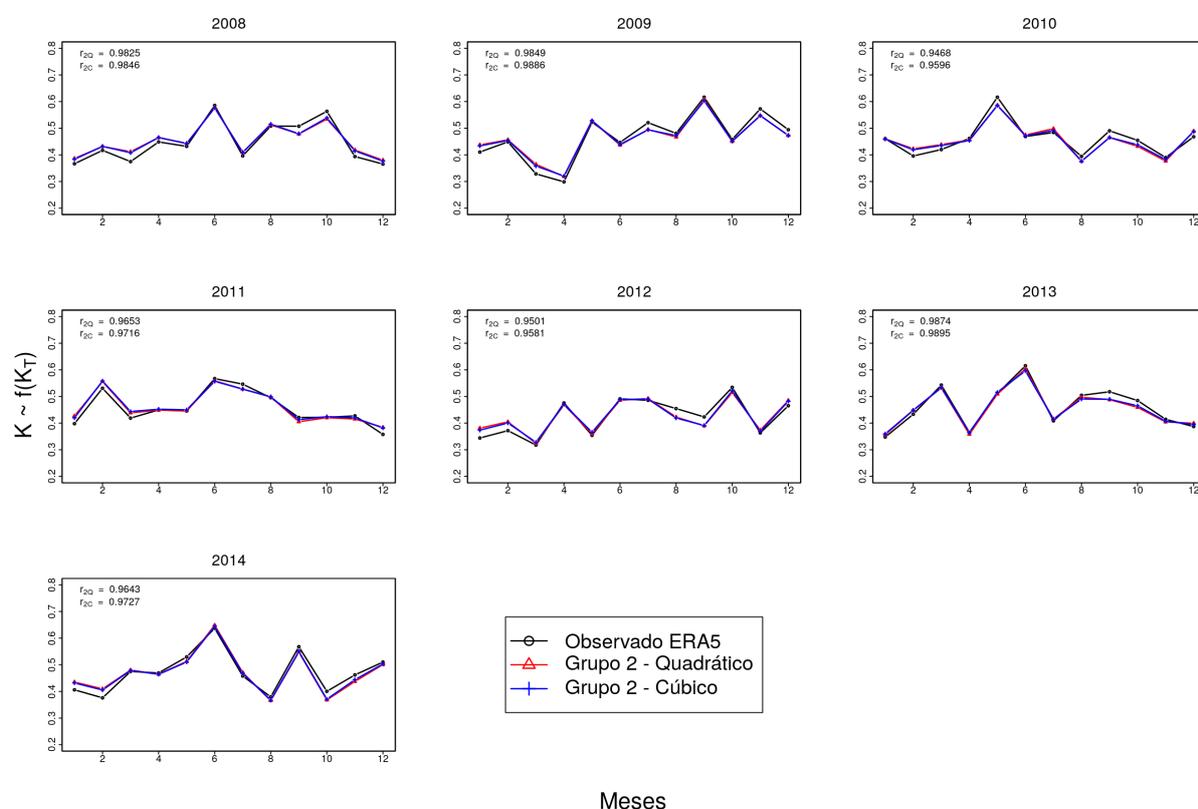
Figura 21 – Comparativo entre os polinômios do Grupo 1, expressos pelas equações 20 e 21 (linhas vermelha e azul, respectivamente), e a fração difusa \overline{K}_{ERA5} , para Frederico Westphalen.



Fonte: A autora.

A Figura 22 apresenta os resultados comparativos para o Grupo 2 de polinômios, definidos pela equação 22 (linha vermelhas) e equação 23 (linha azul), os quais são calibrados a partir do índice de claridade \overline{K}_T apenas. De imediato nota-se o aumento das correlações, sendo que em todos os anos a correlação é considerada muito forte (r_{2Q} e $r_{2C} > 0,9$). Também é possível diagnosticar que a diferença de magnitude entre \overline{K} , estimado pelos dois polinômios e o calculado pela reanálise, diminui, quando comparado ao observado no Grupo 1. Entretanto, há semelhança no padrão sazonal e de discrepância, ou seja, períodos de superestimativa e subestimativa coincidem com os da Figura 21, porém com melhor ajuste de magnitude.

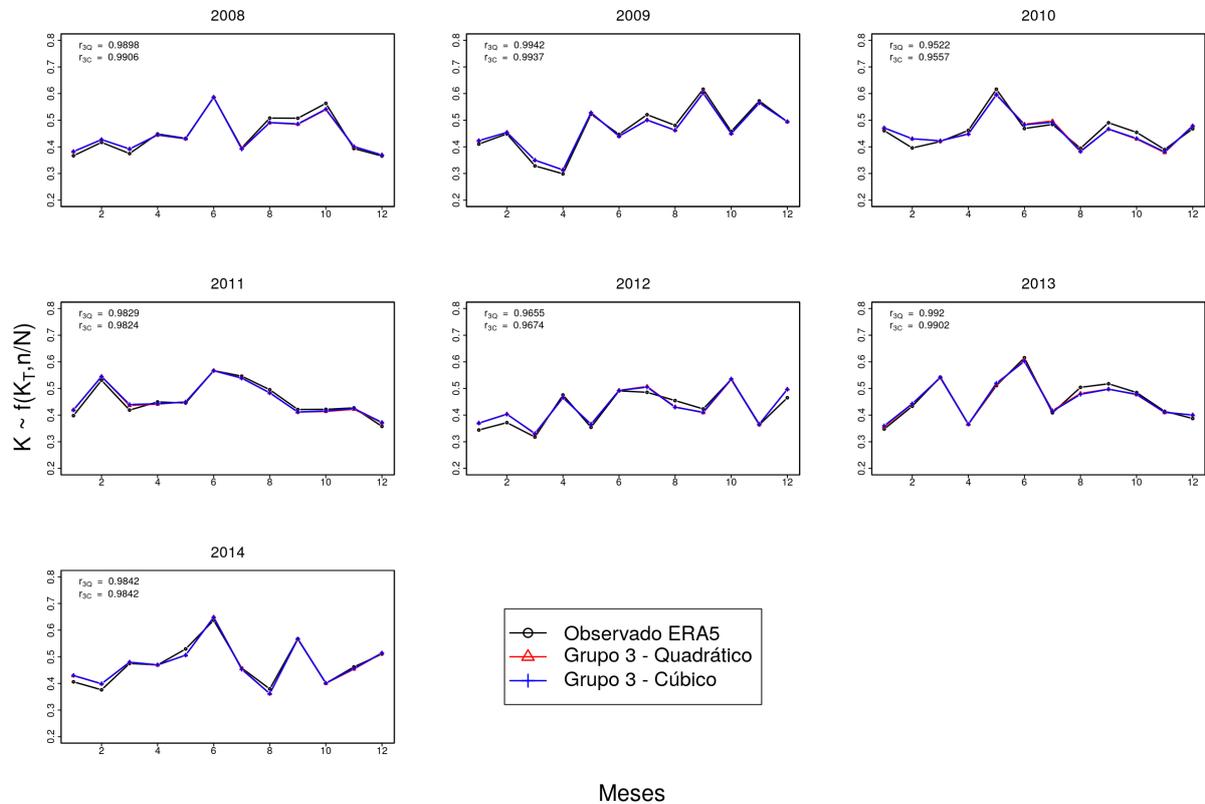
Figura 22 – Comparativo entre os polinômios do Grupo 2, expressos pelas equações 22 e 23, e \overline{K}_{ERA5} dada pela reanálise ERA5, para Frederico Westphalen.



Fonte: A autora.

Como esperado, a estimativa da fração difusa, através da calibração do Grupo 3, mostra uma melhor eficiência a partir do comparativo com da reanálise ERA5. A Figura 23 mostra uma espécie de "ajuste fino", quando utilizamos os parâmetros \overline{K}_T e n/N juntos, definidos pelas equações 24 e 25. Todos os períodos apresentam correlação maior que 0,9655, tanto para o caso quadrático, quanto o cúbico, com exceção de 2010, que por sua vez, melhora em comparação aos cenários anteriores ($r_{1Q} < r_{2Q} < r_{3Q} = 0,9522$ e $r_{1C} < r_{2C} < r_{3C} = 0,9557$). Com a aplicação do Grupo 3, os valores médios mensais de \overline{K} ficam muito próximos aos calculados através dos dados do ERA5, acompanhando o padrão sazonal.

Figura 23 – Estimativa de \overline{K} , expresso pelas equações 24 e 25 (Grupo 3), comparada ao calculado através da reanálise ERA5, para Frederico Westphalen.



Fonte: A autora.

4.2.1.2 Santa Vitória do Palmar

Para estimar a radiação difusa através da média mensal fração difusa diária, para o extremo sul do RS, foram calibrados os modelos empíricos dos três diferentes grupos de dependência. As equações 26 e 27 são as obtidas em função do parâmetro n/N , as quais comparadas com a reanálise ERA5, são mostradas na Figura 24.

- Grupo 1 - Polinômios onde a fração difusa é função do número de horas de sol possíveis (n/N):

$$\overline{K} = 0,7234 - 0,9705 \left(\frac{n}{N} \right) + 0,4907 \left(\frac{n}{N} \right)^2 \quad (26)$$

$$\overline{K} = 0,7359 - 1,2919 \left(\frac{n}{N} \right) + 1,5041 \left(\frac{n}{N} \right)^2 - 0,7264 \left(\frac{n}{N} \right)^3 \quad (27)$$

- Grupo 2 - Polinômios onde \overline{K} é função do índice de claridade (\overline{K}_T):

$$\bar{K} = 1,1325 - 1,3096(\bar{K}_T) - 0,0859(\bar{K}_T)^2 \quad (28)$$

$$\bar{K} = 1,0328 - 0,3162(\bar{K}_T) - 2,7833(\bar{K}_T)^2 + 2,1769(\bar{K}_T)^3 \quad (29)$$

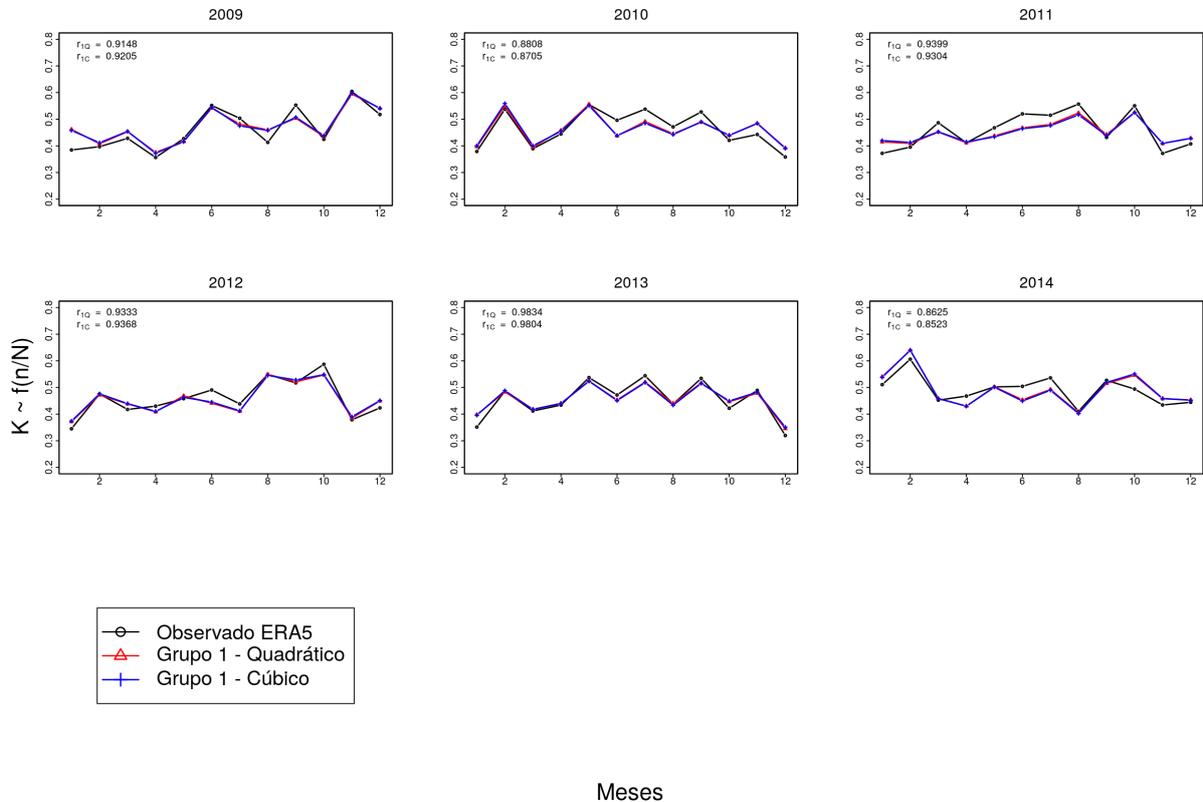
- Grupo 3 - Grupo de polinômios onde \bar{K} é função de \bar{K}_T e n/N :

$$\bar{K} = 1,0913 - 1,1486(\bar{K}_T) + 0,0748(\bar{K}_T)^2 - 0,3346\left(\frac{n}{N}\right) + 0,2070\left(\frac{n}{N}\right)^2 \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \bar{K} = & 1,0573 - 0,8311(\bar{K}_T) - 0,7548(\bar{K}_T)^2 + 0,6641(\bar{K}_T)^3 \\ & - 0,4453\left(\frac{n}{N}\right) + 0,5606\left(\frac{n}{N}\right)^2 - 0,2588\left(\frac{n}{N}\right)^3 \end{aligned} \quad (31)$$

De forma semelhante ao observado subseção anterior, o Grupo 1 subestima a fração difusa nos meses intermediários, como observamos nos anos de 2010, 2011 e 2014 com maior clareza (Figura 24). As correlações são satisfatórias mas, em todo o período analisado, as curvas por ora distantes, intercalando para mais ou para menos, os valores calibrados aos da reanálise. A correlação média mostra que o melhor desempenho dos casos quadrático e cúbico se alterna entre nos anos analisados. Por exemplo, em 2009 $r_{1Q} = 0,9148$ e $r_{1C} = 0,9206$, enquanto em 2010 foram $r_{1Q} = 0,8808$ e $r_{1C} = 0,8705$.

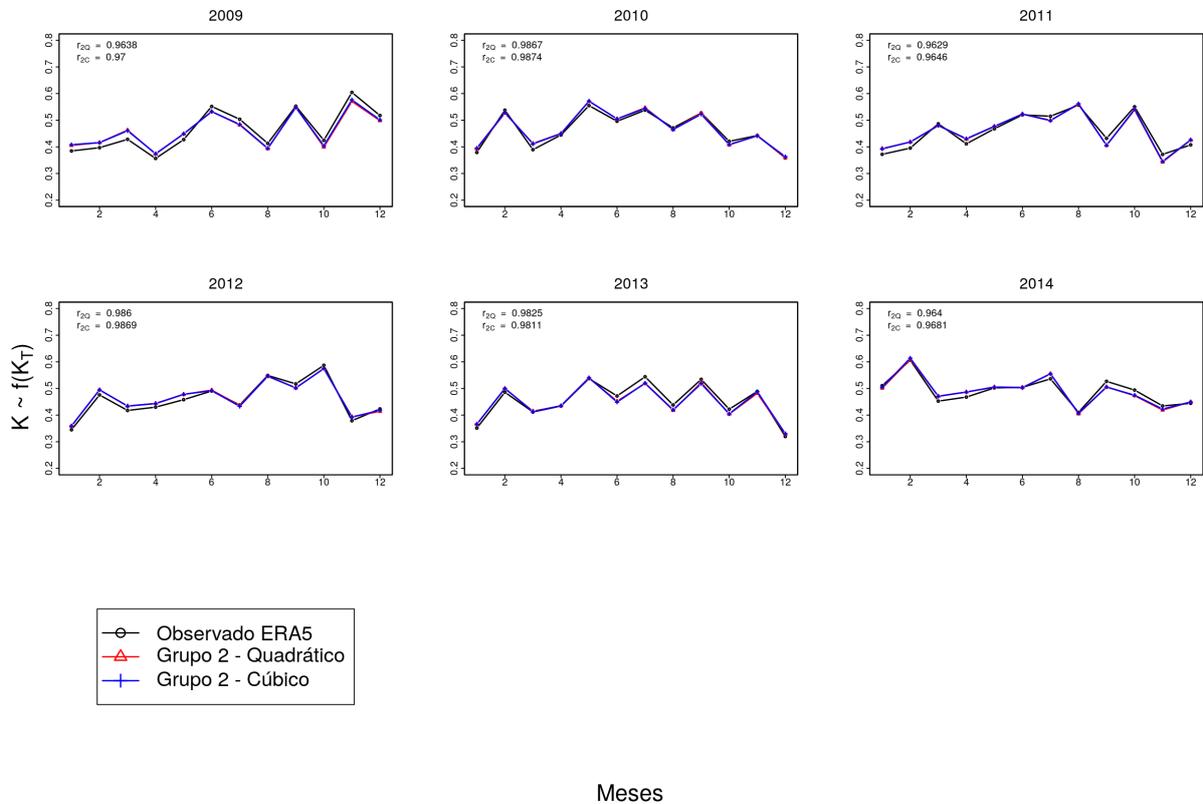
Figura 24 – Comparativo entre os polinômios do Grupo 1 (equações 26 e 27), e a fração difusa da reanálise ERA5, para Santa Vitória do Palmar.



Fonte: A autora.

A Figura 25 apresenta o Grupo 2 (equações 28 e 29) se ajustando de forma melhor que o grupo anterior aos valores calculados (linha preta). A utilização do índice de claridade \overline{K}_T na calibração dos mesmos, eleva a correlação e corrige a diferença entre os modelos. Ainda no quesito correlação, nota-se uma leve tendência ao melhor desempenho do polinômio de grau 3, exceto no ano de 2013, onde $r_{2Q} > r_{2C}$. A magnitude de \overline{K} , se mostra compatível em ambos os casos (quadrático e cúbico), trazendo valores entre 0,3 e 0,7 ao longo do ano, mas com picos em diferentes meses, quando comparados ao norte do RS (Frederico Westphalen).

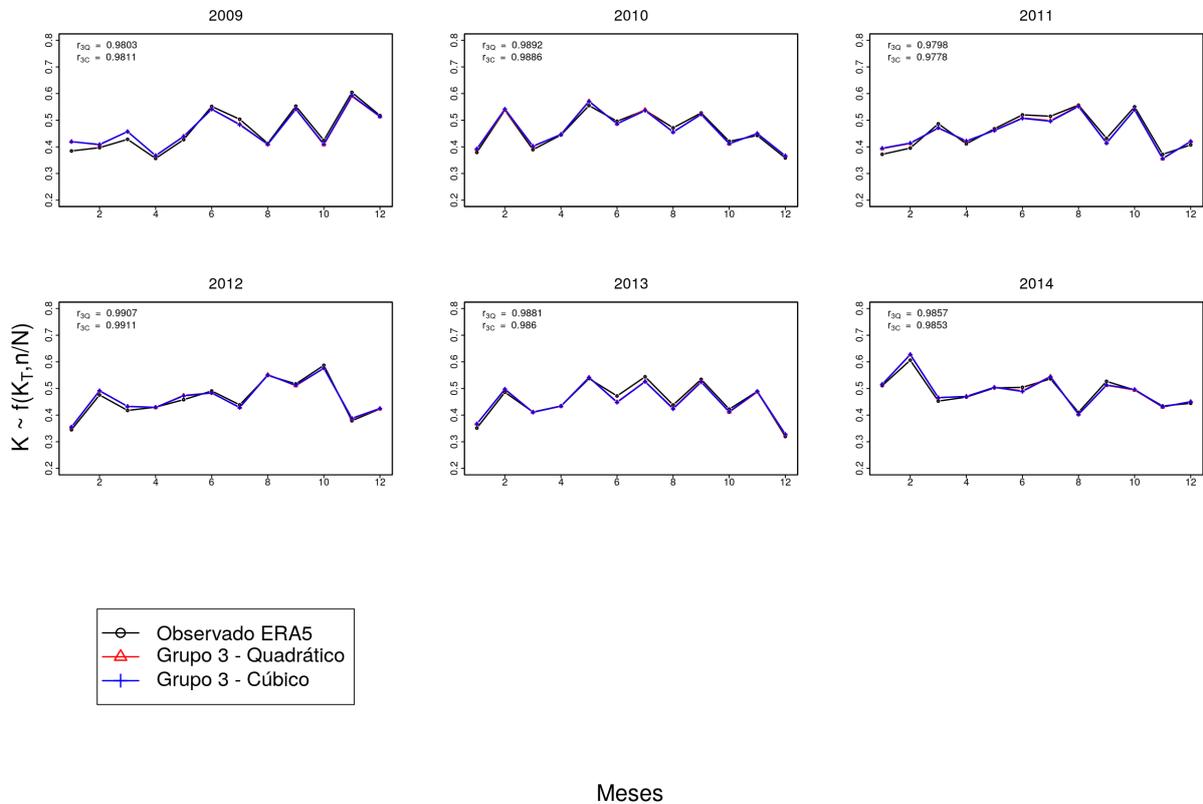
Figura 25 – Polinômios do Grupo 2 (equações 28 e 29) comparados a \overline{K}_{ERA5} calculada a partir da reanálise ERA5, para Santa Vitória do Palmar.



Fonte: A autora.

A fração difusa \overline{K} fica claramente melhor descrito pelos polinômios 30 e 31 através da utilização mútua dos parâmetros n/N e \overline{K}_T . A Figura 26 mostra que as grandezas se mantêm acopladas ao longo de todos os anos, com baixa diferença entre elas. As correlações também aumenta, alcançando, por exemplo, $r_{3Q} = 0,9907$ e $r_{3C} = 0,9911$ para o ano de 2012.

Figura 26 – \overline{K} obtido pelas equações 30 e 31 (Grupo 3) comparado ao calculado através da reanálise ERA5, para Santa Vitória do Palmar.



Fonte: A autora.

4.2.1.3 Tramandaí

As equações de 32 a 37, definidas a seguir, representam a calibração dos modelos polinomiais para a média mensal da fração difusa diária, a partir dos parâmetros n/N e \overline{K}_T , para Tramandaí. Cabe ressaltar que Tramandaí é o ponto mais oriental analisado no presente estudo.

- Grupo 1 - Fração difusa \overline{K} em função do número de horas de sol possíveis (n/N):

$$\overline{K} = 0,7060 - 0,9224 \left(\frac{n}{N} \right) + 0,4838 \left(\frac{n}{N} \right)^2 \quad (32)$$

$$\overline{K} = 0,7083 - 1,2570 \left(\frac{n}{N} \right) + 1,5504 \left(\frac{n}{N} \right)^2 - 0,7691 \left(\frac{n}{N} \right)^3 \quad (33)$$

- Grupo 2 - Grupo de polinômios onde \overline{K} é função do índice de claridade (\overline{K}_T):

$$\overline{K} = 1,1324 - 1,5524(\overline{K}_T) + 0,2703(\overline{K}_T)^2 \quad (34)$$

$$\bar{K} = 1,0803 - 1,0167(\bar{K}_T) - 1,2418(\bar{K}_T)^2 + 1,2661(\bar{K}_T)^3 \quad (35)$$

- Grupo 3 - Grupo de polinômios onde \bar{K} é função de \bar{K}_T e n/N :

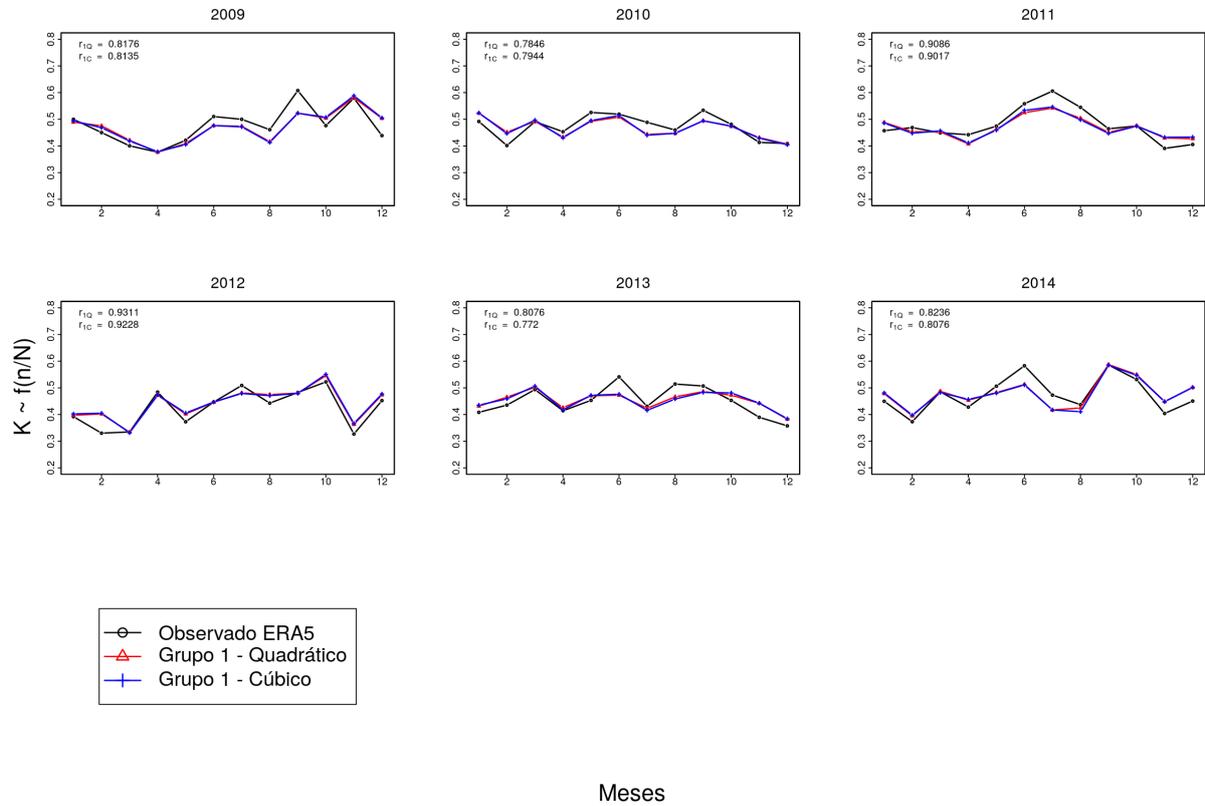
$$\bar{K} = 1,0772 - 1,2709(\bar{K}_T) + 0,2703(\bar{K}_T)^2 - 0,3611\left(\frac{n}{N}\right) + 0,2444\left(\frac{n}{N}\right)^2 \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \bar{K} = 1,0672 - 1,2017(\bar{K}_T) + 0,1472(\bar{K}_T)^2 + 0,0724(\bar{K}_T)^3 \\ - 0,4812\left(\frac{n}{N}\right) + 0,6078\left(\frac{n}{N}\right)^2 - 0,2573\left(\frac{n}{N}\right)^3 \end{aligned} \quad (37)$$

O comportamento da eficiência das estimativas em relação à reanálise ERA5, segue o mesmo padrão observado na análise das cidades anteriores. O Grupo 1 (equações 32 e 33), apresentado na Figura 27, foi o que trouxe valores mais distintos, por exemplo, como observado para 2011 e 2014, nos meses de junho a agosto, e em 2009, agosto e setembro, quando os polinômios subestimam a reanálise. A Figura 28 mostra que o Grupo 2 (equações 34 e 35) evoluiu no comparativo à reanálise, diminuindo a diferença entre as magnitudes, e ajustando o comportamento sazonal em todos os anos. Finalmente, o Grupo 3 (equações 36 e 37) traz o melhor desempenho, ajustando os polinômios ao valor calculado através da reanálise ERA5 (Figura 29). As magnitudes de \bar{K} variam juntamente, respeitando a variação anual, resultando em valores aproximadamente entre o mínimo 0,35 (fevereiro de 2012) e não maiores que 0,65 (setembro de 2009). Nota-se também, que os picos são denotados pelos calculados a partir dos dados do ERA5 (linha preta).

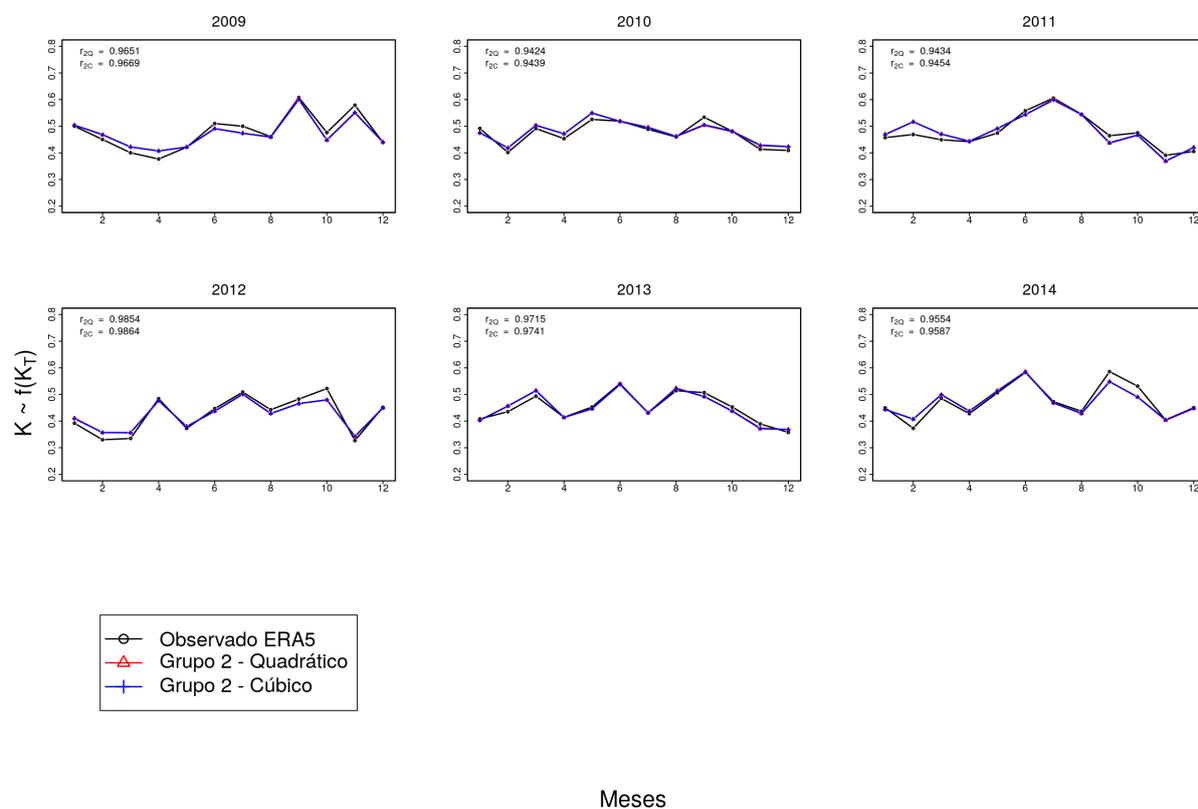
As correlações também têm avanço entre os Grupos 1 e 3. Enquanto a pior correlação foi encontrada para o polinômio cúbico do Grupo 1, com $r_{1C} = 0,772$ (Figura 27 - ano 2013), as estimativas quadrática e cúbica do Grupo 3, apresentaram $r_{3Q} = 0,9948$ e $r_{3Q} = 0,9945$, respectivamente, no ano de 2012 (Figura 29).

Figura 27 – Comparativo entre os polinômios do Grupo 1 (equações 32 (linha vermelha) e 33 (linha azul)), e \overline{K}_{ERA5} calculada a partir da reanálise ERA5 (linha preta), para Tramandaí.



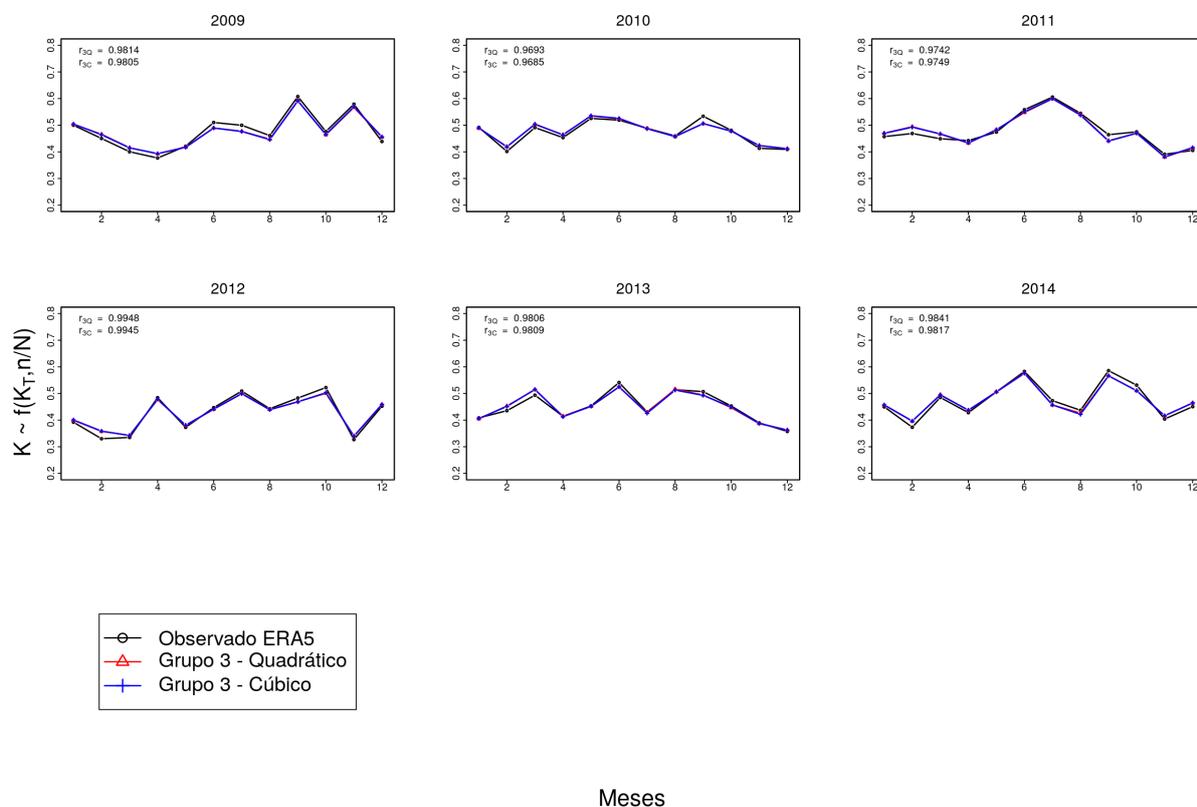
Fonte: A autora.

Figura 28 – O mesmo que a Figura 27, entretanto utilizando o Grupo 2 de polinômios (equações 34 e 35).



Fonte: A autora.

Figura 29 – Fração difusa \overline{K} obtida pelas equações 36 e 37 comparado à reanálise ERA5, para Tramandaí.



Fonte: A autora.

4.2.1.4 Uruguiana

Para a região oeste do RS, os polinômios foram calibrados para a cidade de Uruguiana. O resultado é mostrado pelas equações 38 e 39 que representam o Grupo 1, dependente de n/N , as equações 40 e 41 que representam o Grupo 2, função do índice de claridade, e as equações 42 e 43 representantes do Grupo 3, função dos dois parâmetros anteriores.

- Grupo 1 - \overline{K} em função de n/N :

$$\overline{K} = 0,7534 - 0,9937 \left(\frac{n}{N} \right) + 0,4722 \left(\frac{n}{N} \right)^2 \quad (38)$$

$$\overline{K} = 0,7587 - 1,1916 \left(\frac{n}{N} \right) + 1,0453 \left(\frac{n}{N} \right)^2 - 0,3911 \left(\frac{n}{N} \right)^3 \quad (39)$$

- Grupo 2 - \overline{K} em função de \overline{K}_T :

$$\bar{K} = 1,1030 - 1,3482(\bar{K}_T) + 0,0240(\bar{K}_T)^2 \quad (40)$$

$$\bar{K} = 1,0225 - 0,5054(\bar{K}_T) - 2,3309(\bar{K}_T)^2 + 1,9271(\bar{K}_T)^3 \quad (41)$$

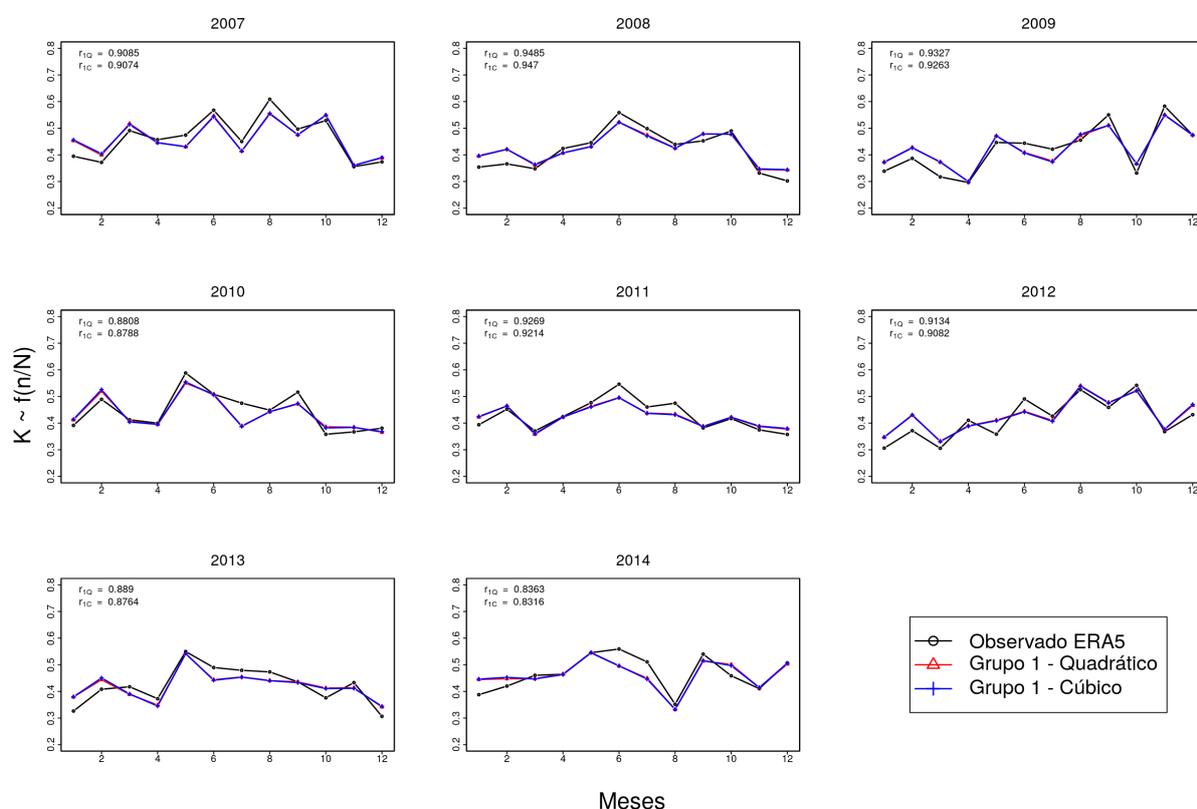
- Grupo 3 - \bar{K} em função de claridade \bar{K}_T e n/N :

$$\bar{K} = 1,0668 - 1,1133(\bar{K}_T) + 0,0516(\bar{K}_T)^2 - 0,3502\left(\frac{n}{N}\right) + 0,2247\left(\frac{n}{N}\right)^2 \quad (42)$$

$$\begin{aligned} \bar{K} = 1,0310 - 0,7276(\bar{K}_T) - 1,0618(\bar{K}_T)^2 + 0,9397(\bar{K}_T)^3 \\ - 0,3794\left(\frac{n}{N}\right) + 0,3375\left(\frac{n}{N}\right)^2 - 0,0902\left(\frac{n}{N}\right)^3 \end{aligned} \quad (43)$$

Os dois polinômios (quadrático e cúbico) do Grupo 1 mostraram pouca diferença entre si, nas estimativas dos oito anos analisados. Quando comparados ao modelo de reanálise, vemos que estes alternam entre valores mensais maiores e menores que o ERA5, ao longo dos anos (Figura 30). Qualitativamente, fica claro que os valores são subestimados, pelo Grupo 1, nos meses intermediários (de junho a setembro) na maioria dos anos. Já nos meses iniciais, percebe-se a tendência em termos valores maiores através da aproximação polinomial, que os obtidos pela reanálise. Apesar da oscilação entre as magnitudes comparadas, o coeficiente de correlação médio para cada ano, esteve sempre acima de 0,83, sendo 2014 o ano com pior correlação entre as variáveis.

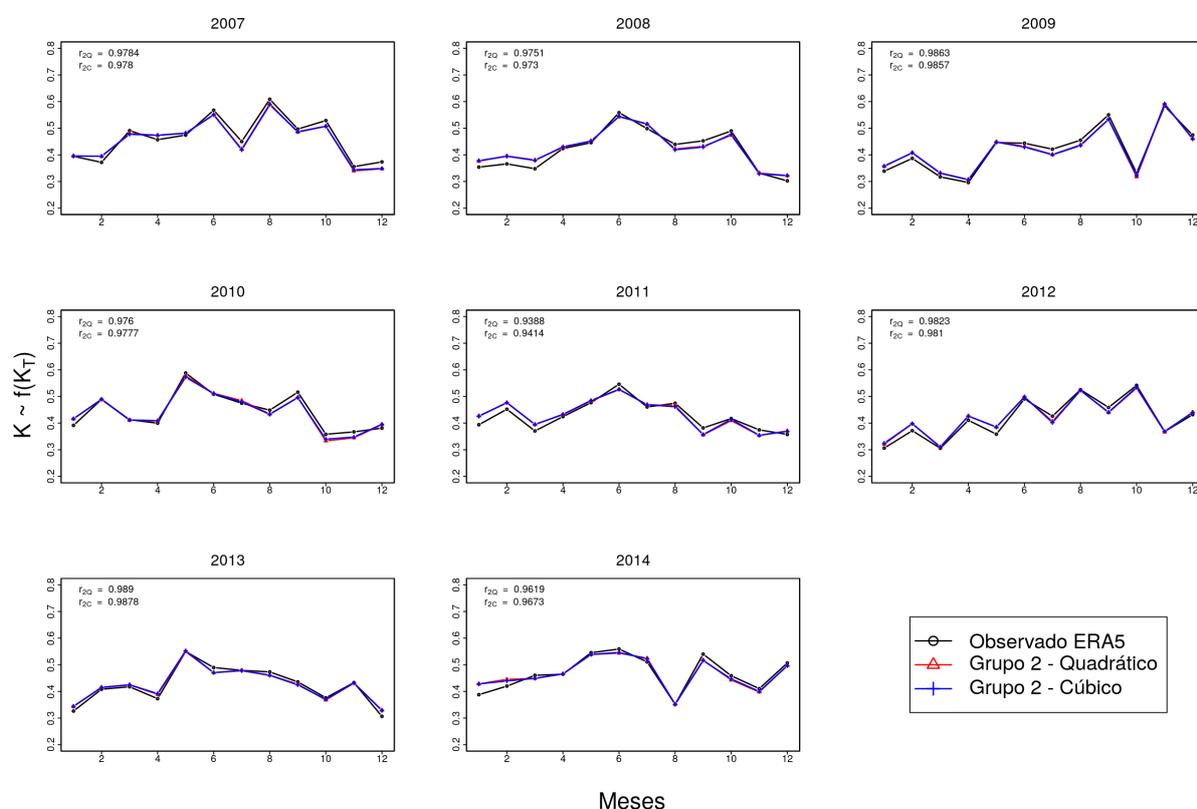
Figura 30 – Polinômios do Grupo 1 (equações 38 (linha vermelha) e 39 (linha azul)) e a fração difusa dada pela ERA5 (linha preta), para Uruguiana entre 2007 e 2014.



Fonte: A autora.

As equações 40 e 41 do Grupo 2, se ajustam de forma altamente satisfatória às estimativas retiradas a partir do ERA5, em todo o período (Figura 31). Podemos perceber que onde o Grupo 1 deixava a desejar, nesse comparativo (ano de 2014), as magnitudes se tornaram muito próximas e as correlações aumentaram consideravelmente, passando de $r_{1Q} \approx r_{1C} \approx 0,83$ para $r_{2Q} \approx r_{2C} \approx 0,96$ (ver Figuras 30 e 31, quadro do ano 2014). No restante do período, a tendência de melhora no ajuste se mostra a mesma, aproximando os valores calculados pelas duas fontes e, aumentando a correlação entre as mesmas.

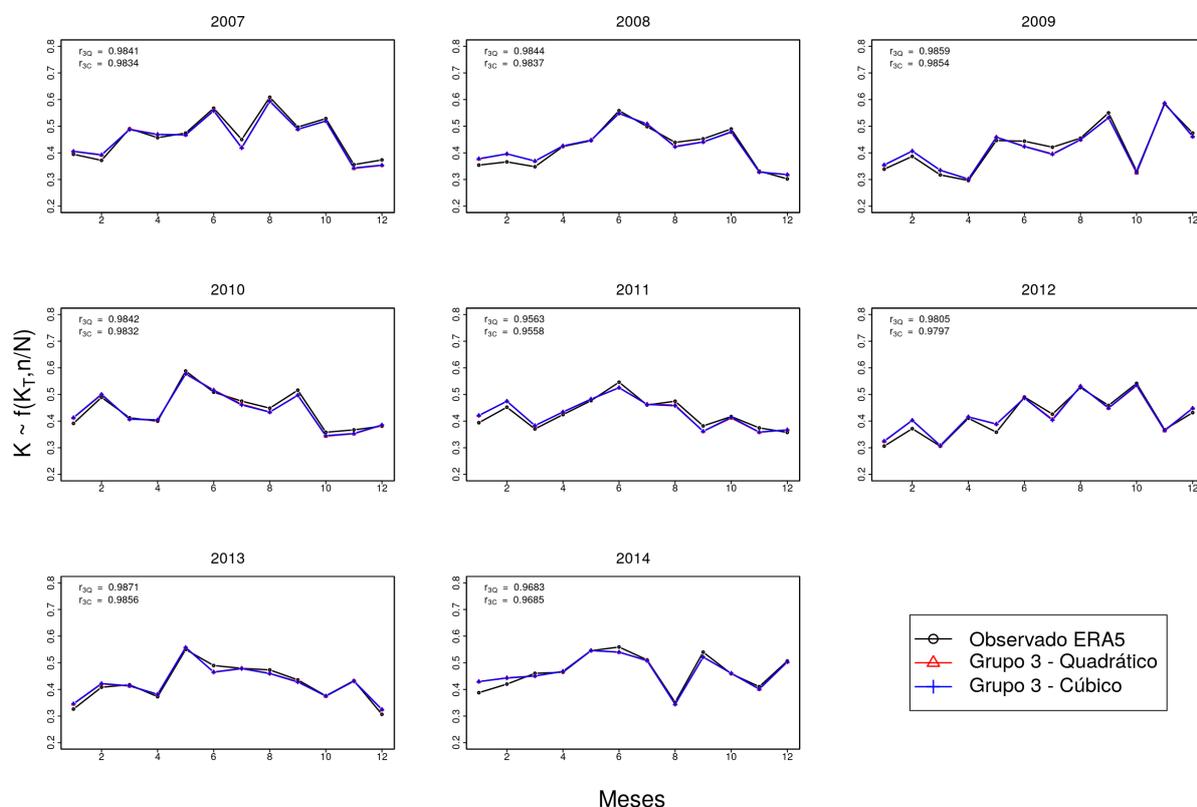
Figura 31 – Grupo 2 (equações 40 e 41) comparado a K_{ERA5} calculada a partir da reanálise ERA5, para Uruguaiana, no período de 2007 a 2014.



Fonte: A autora.

A Figura 32 mostra o comparativo entre o Grupo 3 e a reanálise ERA5, para fração difusa \bar{K} . Novamente, comprova-se que a utilização dos parâmetros \bar{K}_T e n/N juntos, para a calibração de uma equação que estime \bar{K} de forma satisfatória, é uma boa metodologia a ser adotada. As correlações, em todo o período, são as maiores entre os três Grupos de polinômios (para Uruguaiana), atingindo $r_{3Q} = 0,9871$ e $r_{3C} = 0,9856$ no ano de 2013. Nos meses de janeiro e fevereiro, dos anos de 2008, 2011, 2012 e 2014, quando as estimativas polinomiais se afastam do valor calculado a partir da reanálise, superestimando \bar{K} , temos as maiores diferenças de magnitude. Os polinômios do Grupo 3, como também observado nas localidades anteriores, traz uma espécie de ajuste fino às estimativas de \bar{K} , de forma que, fica claro a menor relevância quanto ao grau do polinômio e a eficiência da utilização do índice de claridade \bar{K}_T e da razão n/N de forma conjunta (dentro do Grupo 3).

Figura 32 – Estimativa da fração difusa, através das equações do Grupo 3 (equações 42 e 43), comparada ao cálculo através da reanálise ERA5, para Uruguaiana.



4.2.1.5 Santa Maria

Para uma cidade localizada na região central do estado, foram calibrados os três grupos de polinômios, utilizando treze anos de dados, a seguir comparados aos calculados a partir da reanálise ERA5, a fim da validação, para a cidade de Santa Maria. As equações de 44 a 49 representam o resultado obtido dessa calibração.

- Grupo 1 - Grupo de polinômios onde \bar{K} é função do número de horas de sol possíveis (n/N):

$$\bar{K} = 0,7600 - 1,0416 \left(\frac{n}{N} \right) + 0,5261 \left(\frac{n}{N} \right)^2 \quad (44)$$

$$\bar{K} = 0,7620 - 1,2818 \left(\frac{n}{N} \right) + 1,2838 \left(\frac{n}{N} \right)^2 - 0,5411 \left(\frac{n}{N} \right)^3 \quad (45)$$

- Grupo 2 - Grupo de polinômios onde \bar{K} é função do índice de claridade (\bar{K}_T):

$$\bar{K} = 1,1028 - 1,2692(\bar{K}_T) - 0,0954(\bar{K}_T)^2 \quad (46)$$

$$\bar{K} = 1,0041 - 0,1889(\bar{K}_T) - 3,2121(\bar{K}_T)^2 + 2,6180(\bar{K}_T)^3 \quad (47)$$

- Grupo 3 - Grupo de polinômios onde \bar{K} é função tanto de \bar{K}_T quanto de n/N :

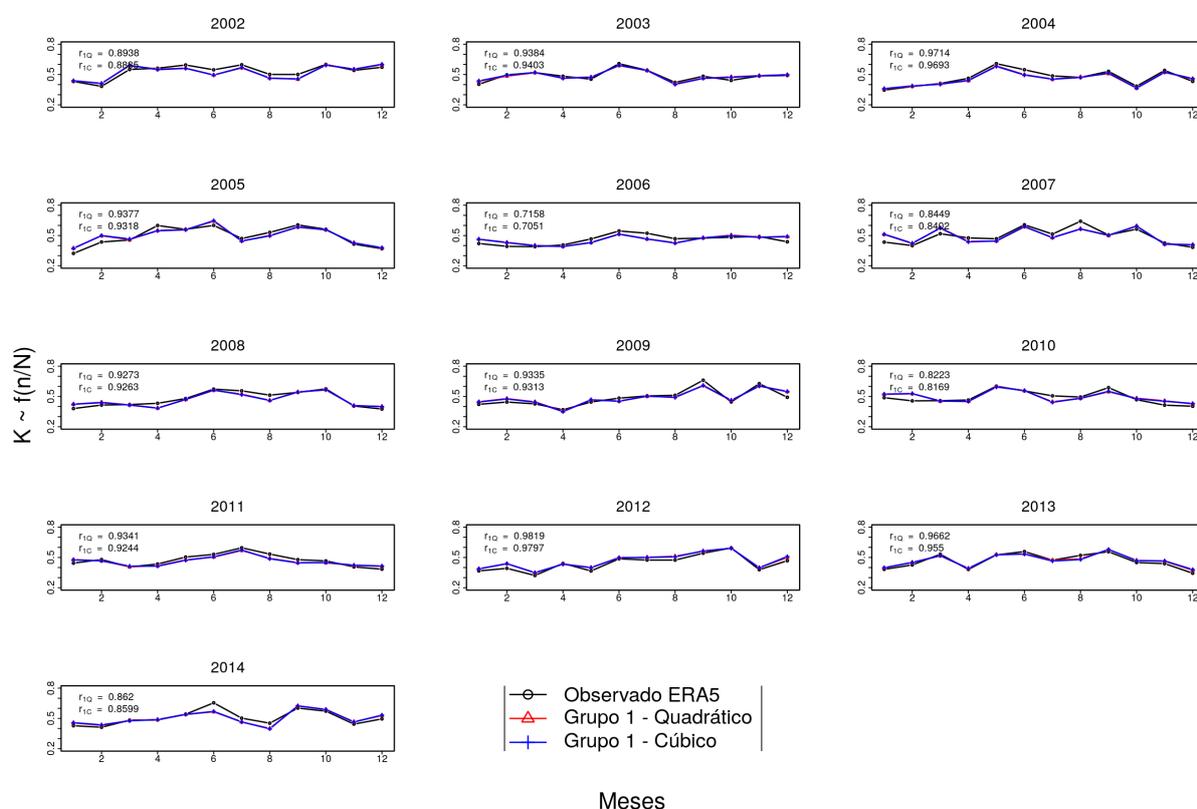
$$\bar{K} = 1,0596 - 1,0445(\bar{K}_T) - 0,0241(\bar{K}_T)^2 - 0,3657\left(\frac{n}{N}\right) + 0,2402\left(\frac{n}{N}\right)^2 \quad (48)$$

$$\begin{aligned} \bar{K} = & 1,0079 - 0,4667(\bar{K}_T) - 1,7499(\bar{K}_T)^2 + 1,4941(\bar{K}_T)^3 \\ & - 0,4128\left(\frac{n}{N}\right) + 0,4397\left(\frac{n}{N}\right)^2 - 0,1660\left(\frac{n}{N}\right)^3 \end{aligned} \quad (49)$$

Os polinômios de grau 2 e 3, dependentes exclusivamente do número de horas de sol possíveis (parâmetro n/N), juntamente com o resultado calculado pelos dados da reanálise, para a fração difusa \bar{K} , estão expostos na Figura 33. Quanto a relação entre o polinômio quadrático (linha vermelha) e o cúbico (linha azul), novamente podemos concluir que esses não apresentam grandes diferenças entre si. Isso se repete nos Grupo seguintes, como veremos a diante. A discrepância entre os mesmos e o valor calculado com o ERA5 (linha preta) é que se torna perceptível nesse Grupo (função apenas de n/N). Para o ano de 2002, por exemplo, vemos que nos meses iniciais e finais, a estimativa polinomial está muito próxima à reanálise, enquanto nos meses intermediários, esta parece um tanto distante, com valores inferiores aos esperados. Por outro lado, vemos que em alguns anos o pior desempenho do Grupo 1 ocorre nos meses iniciais, como por exemplo 2005 e 2007. Ainda, podemos diagnosticar um intervalo no ano de 2014 (junho, julho e agosto) onde o Grupo estimou para menos a fração difusa, apresentando ainda a diferença mais significativa, no mês 6 (ver Figura 33).

Por se tratar da localidade com maior período de análise, podemos ver um cenário no qual as correlações não estão diretamente ligadas ao desempenho dos polinômios. Isso já era esperado, uma vez que o coeficiente de correlação de Pearson denota mais a relação de tendência entre as variáveis do que suas magnitudes, fato que, até o momento, não havíamos diagnosticado com clareza. Entretanto, para Santa Maria, podemos notar que anos onde há diferenças significativas entre as estimativas (2005, 2007 e 2014) apresentam correlações maiores que em 2006, por exemplo, onde as magnitudes são muito próximas. Veja que enquanto, $r_{1Q} \approx r_{1C} \approx 0,93$ em 2005, no ano seguinte $r_{1Q} \approx r_{1C} \approx 0,71$ (Figura 33- quadro 2006).

Figura 33 – Comparativo entre os polinômios do Grupo 1 (equações 44 e 45) e fração difusa \overline{K}_{ERA5} , para Santa Maria.

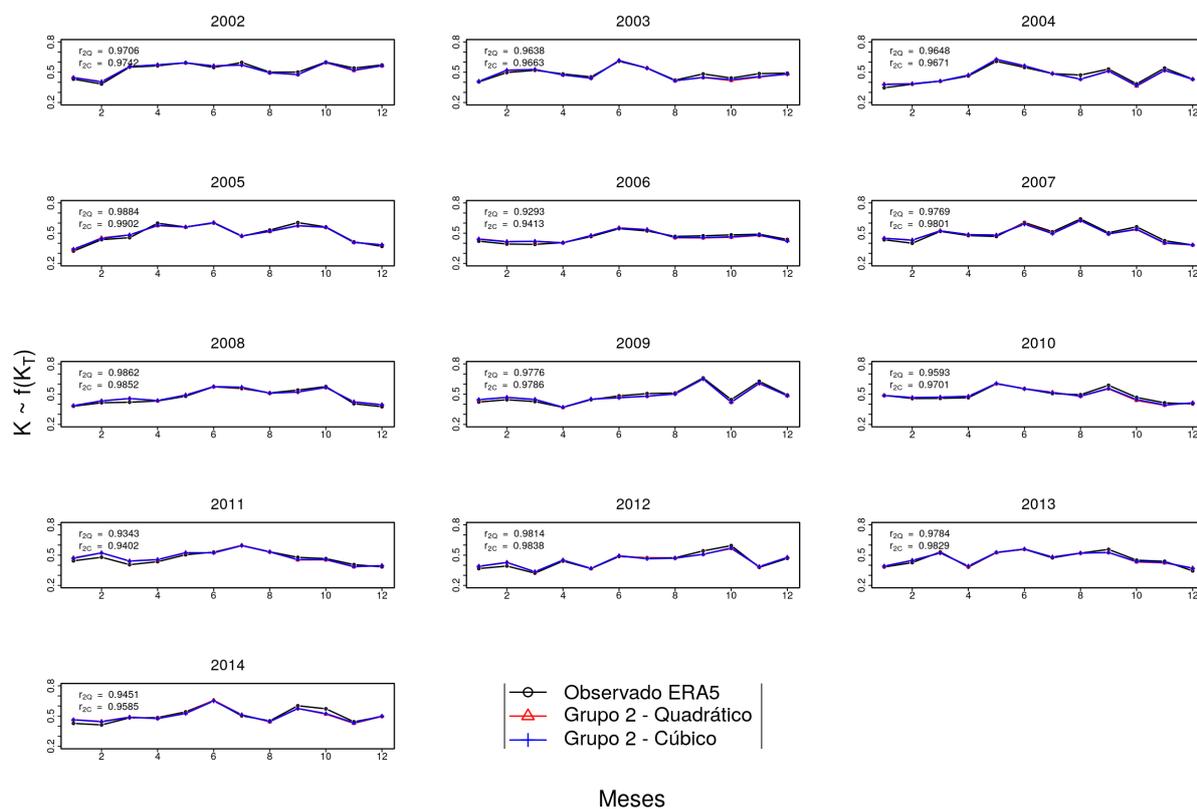


Fonte: A autora.

Para os Grupos 2 e 3, referentes à Santa Maria, faremos uma análise qualitativa uma tanto sucinta, visto que há grande semelhança com as conclusões observadas nas subseções anteriores. A Figura 34 mostra que o Grupo 2, definido pelas equações 46, 47, evolui no papel de estimar \overline{K} em magnitude, sendo que há o ajuste em pontos onde haviam grande discrepância comparados ao valor calculado pela reanálise. Também as correlações médias aumentam, de forma que todas são consideradas muito fortes, sendo a menor delas observada no polinômio quadrático em 2006 ($r_{2Q} = 0,9293$). A mesma perspectiva de aumento de desempenho é observada para o Grupo 3 (equações 48 e 49), onde existe um já mencionado "ajuste fino" quanto a magnitude das estimativas (Figura 35). Se o grupo anterior, corrige os picos de discrepância, o Grupo 3 de polinômios melhora as estimativas como um todo, sendo todos os valores muito próximos ao modelo de reanálise. Dessa forma, as correlações médias também são as maiores, não havendo valores inferiores a 0,96. Vale salientar que em períodos onde, desde o Grupo 1 existe boa estimativa e correlação entre os valores, os Grupos seguintes só o fizeram aumentar, como por exemplo em 2012, onde $r_{1Q} = 0,9819$ e $r_{1C} = 0,9797$ (Figura 33), passando para $r_{2Q} = 0,9814$ e $r_{2C} = 0,9838$ no Grupo 2 (Figura 34) e chegando a $r_{3Q} = 0,9903$ e $r_{3C} = 0,9908$ no Grupo 3 (Figura 35). Por fim, podemos novamente concluir que a utilização conjunta

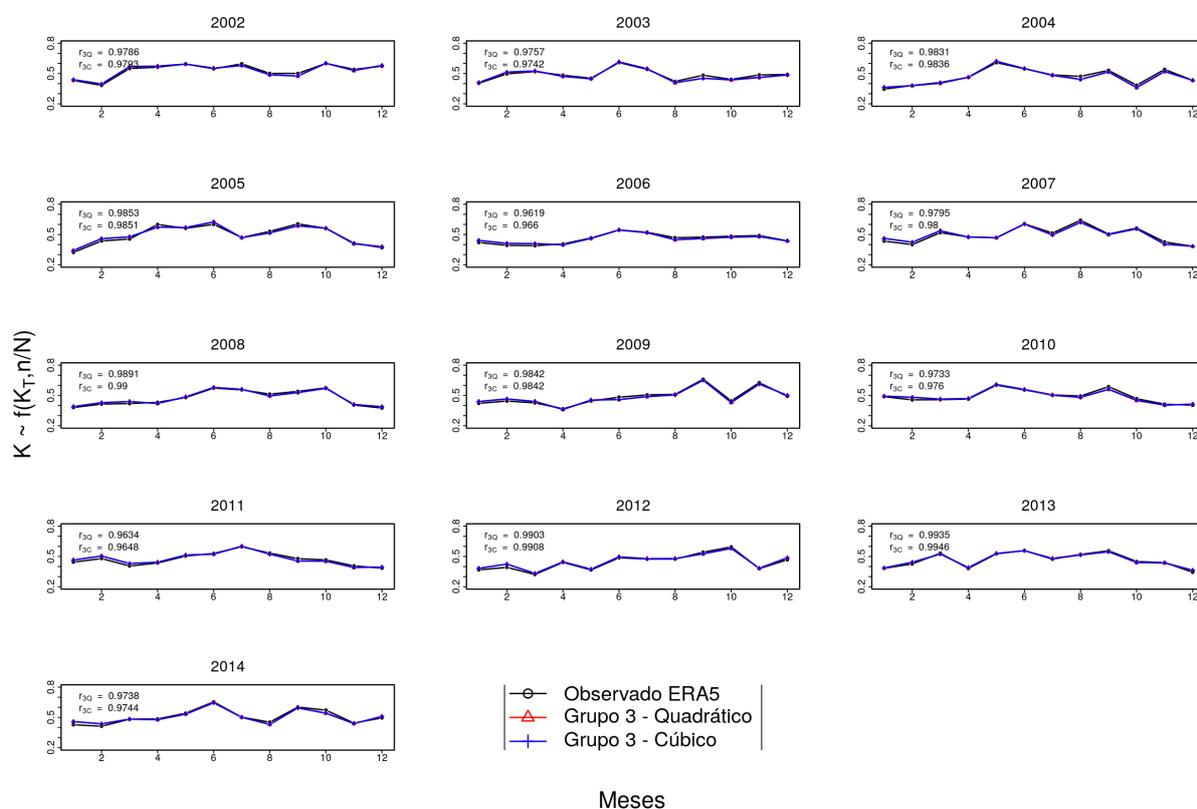
dos parâmetros $\overline{K_T}$ e n/N é o método que se mostra mais eficiente na estimativa a fração difusa.

Figura 34 – Fração difusa \overline{K} estimada pelo Grupo 2 (equações 46 e 47) comparado ao calculado a partir da reanálise ERA5, para Santa Maria.



Fonte: A autora.

Figura 35 – Estimativa da fração difusa pelo Grupo 3 (equações 48 e 49) e \overline{K}_{ERA5} , para Santa Maria.



Fonte: A autora.

4.2.1.6 Alegrete

Para representar a região do Pampa Gaúcho, apresentaremos nessa subseção os resultados da estimativa da radiação difusa, através da média mensal da fração difusa diária para Alegrete, localizada no oeste do RS. As estimativas obtidas através do Grupo 1, calibrados a partir do parâmetro n/N , que envolve o número de horas de sol possíveis, os quais foram definidos pelas equações 50 e 51, são apresentadas na Figura 36. De forma geral, percebe-se que o Grupo 1, assim como observado em outras localidades, fornece valores que por vezes são maiores e, por vezes menores, que os calculados a partir da reanálise ERA5. Apesar de acompanhar o padrão sazonal de cada ano, o que leva a termos correlações médias entre as grandezas sempre acima de 0,83 (a menor é $r_{1C} = 0,8399$, em 2014), a estimativa parece sempre desajustada quanto a magnitude. Enquanto para o ano de 2007, os polinômios do Grupo 1 parecem se ajustar à reanálise somente a partir do mês 9 (setembro), 2011, por outro lado, apresenta bons resultados desde os meses iniciais. Quanto as maiores diferenças, podemos identificar o mês de junho de 2014, onde o Grupo 1 estima $\overline{K} \approx 0,5$, enquanto o ERA5 fornece $\overline{K} \approx 0,6$

(Figura 36).

- Grupo 1 - Grupo de polinômios onde a fração difusa \bar{K} é função apenas de n/N :

$$\bar{K} = 0,7549 - 1,0376 \left(\frac{n}{N}\right) + 0,5183 \left(\frac{n}{N}\right)^2 \quad (50)$$

$$\bar{K} = 0,7586 - 1,2462 \left(\frac{n}{N}\right) + 1,1534 \left(\frac{n}{N}\right)^2 - 0,4441 \left(\frac{n}{N}\right)^3 \quad (51)$$

- Grupo 2 - Grupo de polinômios onde \bar{K} é função do índice de claridade (\bar{K}_T):

$$\bar{K} = 1,1082 - 1,2912(\bar{K}_T) - 0,0708(\bar{K}_T)^2 \quad (52)$$

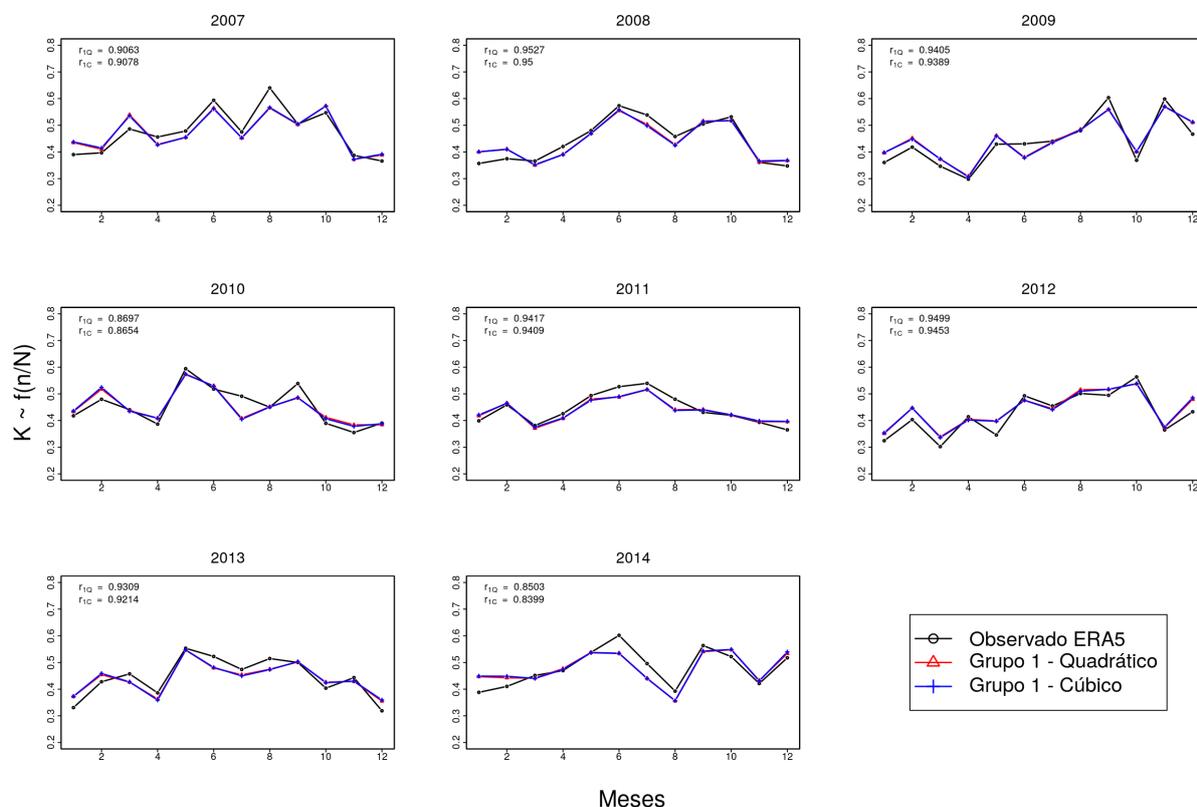
$$\bar{K} = 1,0027 - 0,1849(\bar{K}_T) - 3,1590(\bar{K}_T)^2 + 2,5241(\bar{K}_T)^3 \quad (53)$$

- Grupo 3 - Grupo de polinômios onde \bar{K} é função de \bar{K}_T e n/N :

$$\bar{K} = 1,0712 - 1,0875(\bar{K}_T) + 0,0143(\bar{K}_T)^2 - 0,3642 \left(\frac{n}{N}\right) + 0,2360 \left(\frac{n}{N}\right)^2 \quad (54)$$

$$\begin{aligned} \bar{K} = & 1,0213 - 0,5473(\bar{K}_T) - 1,5604(\bar{K}_T)^2 + 1,3366(\bar{K}_T)^3 \\ & - 0,3865 \left(\frac{n}{N}\right) + 0,3496 \left(\frac{n}{N}\right)^2 - 0,1002 \left(\frac{n}{N}\right)^3 \end{aligned} \quad (55)$$

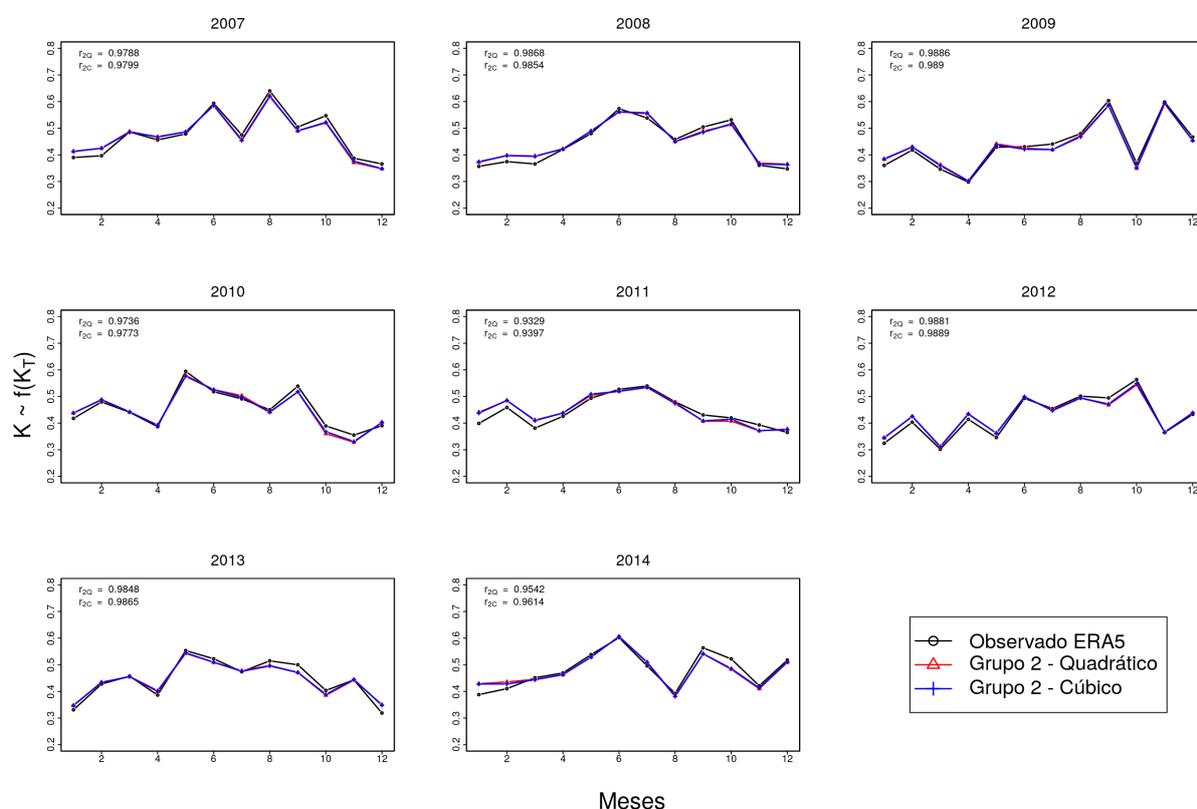
Figura 36 – Comparativo, para Alegrete - RS, entre \overline{K} estimado pelo Grupo 1 (equações 50 e 51 - linhas vermelha e azul, respectivamente) e o obtido a partir dos dados a reanálise ERA5 (linha preta).



Fonte: A autora.

A Figura 37 mostra que o Grupo 2 melhora a estimativa de \overline{K} , no período todo analisado. O utilização do índice de claridade \overline{K}_T faz com que apenas nos meses iniciais (janeiro, fevereiro e março) de 2011 e janeiro de 2014, os valores médios da fração difusa tenham diferença significativa (em magnitude) ao representado pela modelo de reanálise. Também podemos ver que para o ano de 2011, as correlações médias dos polinômios desse grupo, diferentemente do que ocorreu nas demais localidades, diminuem em comparação ao Grupo 1 (Figura 36). Nesse ano, em específico, nota-se que a estimativa através do Grupo 2 soluciona o erro nos meses intermediários, mas desajusta os meses de janeiro e fevereiro (também em comparação ao Grupo 1).

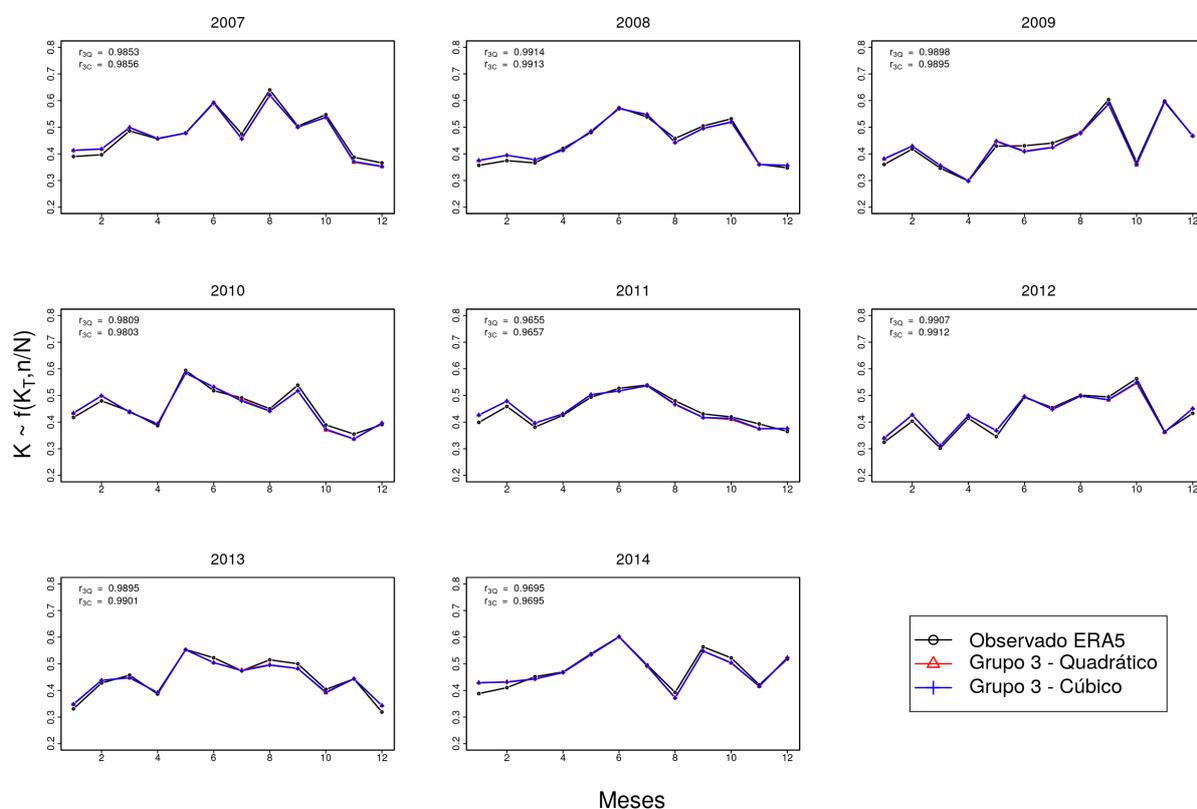
Figura 37 – O mesmo que a Figura 36, entretanto utilizando o Grupo 2 (polinômios 52 e 53).



Fonte: A autora.

Se a exibição dos resultados da utilização do Grupo 2, para Alegrete, trouxe alguma dúvida quanto a melhora da estimativa da radiação difusa, os resultados a partir do Grupo 3 retomam a conclusão de que, o índice de claridade (\overline{K}_T) e o parâmetro n/N utilizados juntos é a melhor metodologia, entre as três que utilizamos nesse estudo, para a determinação de \overline{K} . A Figura 38 mostra o aumento na exatidão das estimativas, tanto do polinômio quadrático quanto do cúbico, do Grupo 3. É possível entretanto perceber que os meses iniciais, exceto em 2013, são os que têm o erro mais acentuado, de forma que os polinômios superestimam \overline{K} . As correlações, por sua vez, aumentam em todos os períodos, assim como nos demais locais analisados. Correlações médias são maiores que 0,96 em todo o período, quando utilizando o terceiro Grupo de polinômios.

Figura 38 – Estimativa da radiação difusa, através de \overline{K} , utilizando o Grupo 3 (equações 54 e 55) comparados à estimativa através do ERA5, para Alegrete.



Fonte: A autora.

4.2.2 Estatística das estimativas da fração difusa

Os resultados apresentados na seção 4.2.1 para a estimativa da fração difusa \overline{K} , comparando os diferentes modelos polinomiais e o valor expresso através da reanálise ERA5, se mostraram de acordo com o esperado para a região e obtiveram boa concordância entre si. Entretanto, apesar de quantificar a correlação entre as grandezas durante a análise, essa se deu de modo quase que exclusivamente qualitativo, principalmente no comparativo de magnitude entre os métodos. Para consolidar os resultados obtidos, se faz necessário então obter a confiabilidade dos mesmos, através de um estudo estatístico dos coeficientes encontrados e dos erros entre as estimativas.

A Tabela 3 apresenta informações resumidas através de alguns parâmetros estatísticos, aos quais as estimativas da fração difusa foram submetidas. As correlações médias mostram que, em todos os locais, os valores de \overline{K} que mais se aproximam aos calculados pela ERA5 são os estimados pelos polinômios do Grupo 3. Devido a dependência mútua dos forçantes (\overline{K}_T e n/N), utilizados nesse estudo, tanto o polinômio de grau dois quanto o cúbico, apresentam os maiores índices de correlação média com a reanálise (0,9789

$< \bar{r}_Q < 0,9856$ e $0,9782 < \bar{r}_C < 0,9850$, respectivamente), destacadas (em negrito) na tabela. Com correlações médias também muito fortes, as estimativas de \bar{K} dadas a partir do índice de claridade \bar{K}_T (Grupo 2), utilizando os modelos quadráticos e cúbicos calibrados, também mostram bom desempenho ($0,9605 < \bar{r}_Q < 0,9735$ e $0,9626 < \bar{r}_C < 0,9764$). Por fim, com menor desempenho no quesito correlação aparece o Grupo 1, que estima \bar{K} unicamente através do parâmetro n/N . Enquanto os Grupos 2 e 3 se mostram eficientes independentemente do local do estudo, as estimativas a partir do Grupo 1 variam mais, apresentando, valores mínimos de $\bar{r}_Q = 0,8455$ e $\bar{r}_C = 0,8353$, em Tramandaí, e máximos de $\bar{r}_Q = 0,9596$ e $\bar{r}_C = 0,9588$, em Frederico Westphalen.

Os indicadores estatísticos mostram que a metodologia empregada obteve melhor resultado para a fração difusa em Santa Vitória do Palmar. Através das equações 30 e 31, são observadas maiores correlações médias, com $\bar{r}_Q = 0,9856$ e $\bar{r}_C = 0,9850$, respectivamente. Os erros médios também são os menores, com $\overline{MABE}_Q = 0,0105$ e $\overline{MABE}_C = 0,0107$. Além disso, os menores erros quadráticos $\overline{RMSE}_Q = 0,0121$ e $\overline{RMSE}_C = 0,0125$ foram encontrados. Por fim, vale salientar a proximidade entre os parâmetros, quando comparamos o grau dos polinômios, com ligeira vantagem em aplicabilidade do modelo quadrático, nesse local.

A análise qualitativa da seção anterior e os coeficientes de correlação médios, apontam o Grupo 3 como o mais qualificado para estimar corretamente \bar{K} , entretanto isso não ocorre no caso de Tramandaí. Nesse local, mesmo as maiores correlações sendo vistas no Grupo 3 ($\bar{r}_Q = 0,9811$ e $\bar{r}_C = 0,9802$), são detectados os maiores erros para tal grupo, entre todas as cidades, de forma que é o Grupo 2 que apresenta os melhores resultados. O Grupo 3 exibe para seus dois polinômios $\overline{MABE}_Q = 0,0172$ e $\overline{MABE}_C = 0,0171$, enquanto o Grupo 2 traz $\overline{MABE}_Q = 0,0143$ e $\overline{MABE}_C = 0,0140$. Também vemos $\overline{RMSE}_Q = 0,0209$ e $\overline{RMSE}_C = 0,0207$ (Grupo 3) contra $\overline{RMSE}_Q = 0,0179$ e $\overline{RMSE}_C = 0,0176$ (Grupo 2). Apesar disso não é o local onde o Grupo 2 tem os melhores índices.

Podemos constatar também que, em todas as regiões de estudo, além de apresentar as piores correlações médias, o Grupo 1 traz também os maiores erros. Na maioria das cidades os erros desse Grupo comparados aos erros associados, por exemplo, ao Grupo 3, são mais que o dobro de magnitude. Podemos citar o caso de Alegrete, onde os erros quadráticos médios associado ao Grupo 1 são $\overline{RMSE}_Q = 0,0304$ e $\overline{RMSE}_C = 0,0309$, enquanto os do Grupo 3 não ultrapassam $\overline{RMSE}_Q \approx \overline{RMSE}_C = 0,0140$. O mesmo diagnóstico é válido para o erro médio absoluto, sendo esse duas vezes maiores nesse local. Por sua vez, no caso de Frederico Westphalen, as estimativas fornecidas pelo Grupo 1 estiveram próximas às demais, obtendo parâmetros estatísticos similares, desde correlações médias muito fortes, até erros semelhantes (ver Tabela 3).

Tabela 3 – Média das correlações entre a fração difusa estimada pelos polinômios (quadrático e cúbico) e a obtida através da reanálise ERA5 (\bar{r}_Q e \bar{r}_C , respectivamente). Média do erro médio absoluto (\overline{MABE}) e do erro quadrático médio (\overline{RMSE}) entre essas estimativas e K_{ERA5} . Os valores se referem a média para o período analisado em cada local. Os índices Q e C referem-se aos modelos quadrático e cúbico, respectivamente.

Local	\bar{r}_Q	\bar{r}_C	\overline{MABE}_Q	\overline{MABE}_C	\overline{RMSE}_Q	\overline{RMSE}_C
Frederico Westphalen						
$\bar{K} = f(n/N)$	0,9596	0,9588	0,0159	0,0162	0,0187	0,0189
$\bar{K} = f(\bar{K}_T)$	0,9691	0,9750	0,0163	0,0150	0,0189	0,0175
$\bar{K} = f(\bar{K}_T, n/N)$	0,9801	0,9806	0,0118	0,0118	0,0142	0,0143
Santa Vitória do Palmar						
$\bar{K} = f(n/N)$	0,9190	0,9152	0,0237	0,0246	0,0286	0,0294
$\bar{K} = f(\bar{K}_T)$	0,9743	0,9764	0,0136	0,0132	0,0155	0,0150
$\bar{K} = f(\bar{K}_T, n/N)$	0,9856	0,9850	0,0105	0,0107	0,0121	0,0125
Tramandaí						
$\bar{K} = f(n/N)$	0,8455	0,8353	0,0262	0,0274	0,0326	0,0333
$\bar{K} = f(\bar{K}_T)$	0,9605	0,9626	0,0143	0,0140	0,0179	0,0176
$\bar{K} = f(\bar{K}_T, n/N)$	0,9811	0,9802	0,0172	0,0171	0,0209	0,0207
Uruguiana						
$\bar{K} = f(n/N)$	0,9110	0,8996	0,0266	0,0273	0,0317	0,0324
$\bar{K} = f(\bar{K}_T)$	0,9735	0,9740	0,0143	0,0142	0,0165	0,0164
$\bar{K} = f(\bar{K}_T, n/N)$	0,9789	0,9782	0,0125	0,0126	0,0148	0,0151
Santa Maria						
$\bar{K} = f(n/N)$	0,9023	0,8976	0,0246	0,0252	0,0282	0,0301
$\bar{K} = f(\bar{K}_T)$	0,9659	0,9707	0,0152	0,0145	0,0185	0,0175
$\bar{K} = f(\bar{K}_T, n/N)$	0,9794	0,9802	0,0120	0,0119	0,0143	0,0142
Alegrete						
$\bar{K} = f(n/N)$	0,9178	0,9137	0,0256	0,0260	0,0304	0,0309
$\bar{K} = f(\bar{K}_T)$	0,9735	0,9760	0,0146	0,0143	0,0178	0,0166
$\bar{K} = f(\bar{K}_T, n/N)$	0,9828	0,9829	0,0117	0,0118	0,0139	0,0140

Fonte: A autora.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

As análises realizadas nesse estudo forneceram relevantes contribuições a cerca da quantificação da radiação difusa para o estado do Rio Grande do Sul. Considerando que não existem muitos bancos de dados de radiação difusa e reconhecendo a importância da mesma para a energia fotovoltaica, a utilização da reanálise meteorológica como alternativa à falta de medições diretas. Além disso, e o emprego de modelos empíricos na estimativa da média mensal da fração difusa diária são estimativas válidas na estimativa regional da radiação difusa.

Os resultados do presente estudo podem ser sumarizados da seguinte forma:

- Observa-se, através do coeficiente de correlação e da magnitude, alto índice de concordância entre os dados de irradiação horária medida pelas torres do INMET e a fornecida pela reanálise ERA5. Nos estudos de caso vemos que, com exceção de Santa Vitória do Palmar onde a correlação média é forte, todas as demais apresentaram correlações médias muito fortes ($\bar{r} > 0,9$), destacando-se Alegrete com $\bar{r} = 0,9302$, sendo a maior dentre as 36 localidades (Resultados explicitados pela Tabela 2 e pela Figura 19).
- Verifica-se que em relação aos modelos polinomiais utilizados para estimar a média mensal da fração difusa diária os melhores resultados foram obtidos através do Grupo 3 ($\bar{K} = f(\bar{K}_T, n/N)$). Autores como Bakirci (2015), Song et al. (2020) também obtiveram os melhores resultados através da utilização desse Grupo de polinômios. Nesses estudos, alguns modelos empíricos alcançaram correlações médias perfeitas ($\bar{r} = 1$), com a utilização de um polinômio cúbico. Os estudos de casos desse trabalho não mostraram diferença significativa entre os polinômios quadráticos e cúbicos.
- Quanto às séries temporais, observa-se que a variação anual da radiação global (I) apresenta um comportamento sazonal característico, sendo bem representada pela reanálise nas localidades consideradas. Para Mostardas quanto a série temporal da diferença simples ϵ_{abs} não foi possível estabelecer um padrão que defina a relação entre as magnitudes I_{INMET} e I_{ERA5} . Já quanto a série do erro percentual $\epsilon\%$ as maiores diferenças são predominantemente negativas devido a superestimativa por parte da reanálise. Para Bento Gonçalves na série temporal da diferença simples ϵ_{abs} as diferenças ocorreram em todo período. Na série temporal do erro percentual $\epsilon\%$ não foi estabelecer a superestimação ou subestimação por parte da modelagem.

Como continuação do presente trabalho pode se ampliar a validação dos dados da Reanálise Meteorológica ERA5 para outras variáveis meteorológicas que podem influenciar na geração de energia solar; incrementar as análises estatísticas aplicadas às séries

temporais, afim de identificar regiões e períodos onde a utilização dos dados de reanálise deve ser feita com cautela; e construir um modelo de estimativa de radiação difusa considerando as particularidades climáticas de cada região estudada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Boletim de Informações Gerenciais**: Quarto trimestre de 2018. 2018. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/publicacoes>>. Acesso em: 10 abr. 2019.

BAKIRCI, K. Models for the estimation of diffuse solar radiation for typical cities in turkey. **Energy**, Elsevier, v. 82, p. 827–838, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544215001176>>. Acesso em: 15 jul. 2019.

BORGES, R. C. de M. **Cálculo do Nascer e Pôr do Sol**. 1996. Disponível em: <https://www.inf.ufrgs.br/~cabral/Nascer_Por_Sol.html>. Acesso em: 15 mai. 2020.

CHEN, Z. et al. Single-crystal mapbi3 perovskite solar cells exceeding 21% power conversion efficiency. **ACS Energy Letters**, ACS Publications, v. 4, n. 6, p. 1258–1259, 2019. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsenergylett.9b00847>>. Acesso em: 14 set. 2019.

CHESTERMAN, M.; HUFFMAN, R. Collateral damage effects of directed energy weapons. In: **US Air Force T&E Days 2010**. [s.n.], 2010. p. 1713. Disponível em: <<https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2010-1713>>. Acesso em: 07 jul. 2020.

COPELAND, A. W.; BLACK, O. D.; GARRETT, A. The photovoltaic effect. **Chemical reviews**, ACS Publications, v. 31, n. 1, p. 177–226, 1942. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/cr60098a004>>. Acesso em: 22 jun. 2019.

CRESPO, A. A. **Estatística fácil**. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2017.

CROTTI, P. C.; RAMPINELLI, G. A. Estimativa das componentes direta e difusa da radiação solar em superfície horizontal para araranguá/sc a partir de redes meteorológicas. In: **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018**. [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/691>>. Acesso em: 19 jan. 2019.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. John Wiley & Sons, 2013. Disponível em: <https://www.academia.edu/18926928/John_A_Duffie_Solar_Engineering_of_Thermal_Processes_4th_Edition_2013_by_John_Wiley_and_Sons>. Acesso em: 03 ago. 2019.

ECMWF. **ERA5 data documentation**. 2020. Disponível em: <<https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5+%3A+data+documentation>>. Acesso em: 10 jul. 2020.

EL-SEBAILI, A.; TRABEA, A. Estimation of horizontal diffuse solar radiation in Egypt. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 44, n. 15, p. 2471–2482, 2003. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890403000049>>. Acesso em: 14 set. 2019.

Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional**. 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/>>. Acesso em: 10 jul. 2020.

European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - ECMWF. **ERA 5: data documentation**: Era 5. 2020. Disponível em: <<https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5>>. Acesso em: 01 jul. 2020.

FERNANDES, T. M. F. Metodologias de aquisição de dados para o cálculo da radiação solar-o aproveitamento da energia fotovoltaica no parque industrial de lustosa. 2015. Disponível em: <<http://www.e-publicacoes.uerj.br/ojs/index.php/ric>>. Acesso em: 19 jan. 2019.

FUJIWARA, M. et al. Introduction to the sparc reanalysis intercomparison project (s-rip) and overview of the reanalysis systems. **Atmospheric Chemistry and Physics**, Copernicus, v. 17, n. 2, p. 1417–1452, 2017. Disponível em: <<https://www.duo.uio.no/handle/10852/61408>>. Acesso em: 03 jul. 2020.

GREEN, M. A. The path to 25% silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, Wiley Online Library, v. 17, n. 3, p. 183–189, 2009. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/pip.892>>. Acesso em: jul. 2019.

GUIMARÃES, A. P. C. Estimativa de parâmetros da camada atmosférica para cálculo da irradiação solar incidente na superfície terrestre. **UFRJ-Universidade Federal de Rio de Janeiro, Doutor**, 2003. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/tese/200301_guimaraes_a_p_c_dr.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2019.

HENDRICK, F. et al. NDACC/SAOZ UV-visible total ozone measurements: improved retrieval and comparison with correlative ground-based and satellite observations. **Atmospheric Chemistry and Physics**, European Geosciences Union, v. 11, n. 12, p. 5975–5995, 2011. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00512237>>. Acesso em: 11 abr. 2020.

HOFMANN, M.; SECKMEYER, G. A new model for estimating the diffuse fraction of solar irradiance for photovoltaic system simulations. **Energies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 2, p. 248, 2017. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/10/2/248>>. Acesso em: 11 abr. 2020.

HOGAN, R. Radiation quantities in the ecmwf model and mars. **ECMWF, 2016**, 2017.

HOTTEL, H.; WOERTZ, B. Performance of flat-plate solar heat collectors. **Transactions on ASME**, p. 64–91, 1942. Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/5052689>>. Acesso em: 07 jul. 2020.

INMET. **Rede de Estações Meteorológicas Automáticas do INMET. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO**. 2011. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/css/content/topo_iframe/pdf/Nota_Tecnica-Rede_estacoes_INMET.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2019.

LEMONS, L. F. et al. Assessment of solar radiation components in brazil using the brl model. **Renewable energy**, Elsevier, v. 108, p. 569–580, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148117301635>>. Acesso em: 20 jul. 2019.

LIU, B. Y.; JORDAN, R. C. The long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors: with design data for the us, its outlying possessions and canada. **Solar energy**,

Citeseer, v. 7, n. 2, p. 53–74, 1963. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.470.5866&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 19 jan. 2019.

LUTGENS, F. K.; TARBUCK, E. J.; TUSA, D. **The atmosphere**. Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 1995. Disponível em: <<http://ndl.ethernet.edu.et/handle/123456789/78446>>. Acesso em: 01 jul. 2020.

MACAGNAN, M. H. Introdução à radiação solar. **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Univ. do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo: RS**, 2010. Disponível em: <http://www.professor.unisinos.br/mhmac/Energia_Solar_20Termica/Apostila_nova_ver_2010_full.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2020.

MAGARREIRO, C.; FREITAS, S.; BRITO, M. Radiação e energia solar. **Lisboa: Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa**, p. 57–59, 2013. Disponível em: <<https://www.spf.pt/magazines/GFIS/119/article/993/pdf>>. Acesso em: 09 fev. 2019.

MARTINAZZO, C. A. Modelos de estimativa de radiação solar para elaboração de mapas solarimétricos. 2004. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3915/000450642.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 02 fev. 2019.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. Oficina de textos, 2017. Disponível em: <<https://books.google.com.br>>. Acesso em: 15 jun. 2020.

MLAWER, E. J. et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: Rrtm, a validated correlated-k model for the longwave. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 102, n. D14, p. 16663–16682, 1997. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/97JD00237>>. Acesso em: 18 abr. 2020.

MORCRETTE, J. et al. Impact of a new radiation package, mcrad, in the ecmwf integrated forecasting system. **Monthly weather review**, v. 136, n. 12, p. 4773–4798, 2008. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/mwr/article/136/12/4773/68187>>. Acesso em: 18 abr. 2020.

MOREIRA, A. et al. Dados meteorológicos estimados em condições de clima subtropical e a relação com índices de vegetação. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 6, 2017. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44311>>. Acesso em: 18 jul. 2020.

NBR, A. 10899 energia solar fotovoltaica-terminologia. **ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro**, 2006. Disponível em: <<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/8242/abnt-nbr10899-energia-solar-fotovoltaica-terminologia>>. Acesso em: 20 jan. 2019.

NÓBREGA, R. S.; SOUZA, E.; GALVÍNCIO, J. D. Análise da estimativa de precipitação do trmm em uma sub-bacia da amazônia ocidental. **Revista de Geografia**, v. 25, n. 1, p. 6–20, 2008. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/ANALISE-DA-ESTIMATIVA-DE-PRECIPITACAO-DO-TRMM-EM-DA-NÓbrega-Souza/788b620477907f0d5572432cb13f28b58f926f0d?p2df>>. Acesso em: 18 jul. 2020.

OLAUSON, J.; BERGKVIST, M. Modelling the swedish wind power production using merra reanalysis data. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 76, p. 717–725, 2015. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148114008167>>. Acesso em: 17 abr. 2020.

PAI, A. D. Anisotropia da irradiância solar difusa medida pelo método de sombreamento melo-escobedo: fatores de correção anisotrópicos e modelos de estimativa. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2005. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/101722>>. Acesso em: 15 jun. 2020.

PARKER, W. S. Reanalyses and observations: What's the difference? **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 97, n. 9, p. 1565–1572, 2016. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/bams/article/97/9/1565/69542>>. Acesso em: 03 jul. 2020.

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**, Universidade de São Paulo (USP), Escola Superior de Agricultura Luiz de . . . , p. 211–216, 2002. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/sa/v59n2/8912.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2020.

PEREIRA, E. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar–2ª Edição, São José dos Campos**. 2017. Disponível em: <http://www.zonaeletrica.com.br/bsp/apresentacoes/plenaria1/Palestra_ABSolar_28062016.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2019.

PERLIN, J. **Let it shine: the 6,000-year story of solar energy**. New World Library, 2013. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=NHY7DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=mYpjNkgt0J&sig=sb3MzFA2WLP6yjd9I0gZfH4E_78#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 04 abr. 2020.

PVPS, I. Snapshot of global photovoltaic markets. **Report IEA PVPS T1-37**, v. 2020, 2020. Disponível em: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/04/IEA_PVPS_Snapshot_2020.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2020.

RELVA, S. G. **Método de caracterização da irradiação para geração fotovoltaica: uma análise sistêmica da modelagem da energia primária**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-17032017-141345/en.php>>. Acesso em: 28 mai. 2019.

RIDLEY, B.; BOLAND, J.; LAURET, P. Modelling of diffuse solar fraction with multiple predictors. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 35, n. 2, p. 478–483, 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148109003012>>. Acesso em: 26 jan. 2019.

ROSE, S.; APT, J. What can reanalysis data tell us about wind power? **Renewable Energy**, Elsevier, v. 83, p. 963–969, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148115004061>>. Acesso em: 03 jul. 2020.

Secretaria de Planejamento, Orçamento e Gestão-RS. **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul. ISBN: 978-85-89443-22-7 Edição: 4ª ed.** 2019. Disponível em: <<https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/clima-temperatura-e-precipitacao>>. Acesso em: 01 jul. 2020.

SOLAR, G. d. T. de E. Fotovoltaica (cresesb/cepel)-. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**, 2013. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php>>. Acesso em: 09 fev. 2019.

SONG, Z. et al. General models for estimating daily and monthly mean daily diffuse solar radiation in china's subtropical monsoon climatic zone. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 145, p. 318–332, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148119308407>>. Acesso em: 13 jun. 2020.

SOUZA, A. P. d. et al. Annual evolution of global, direct and diffuse radiation and fractions in tilted surfaces. **Engenharia Agrícola**, SciELO Brasil, v. 32, n. 2, p. 247–260, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-69162012000200005&script=sci_arttext>. Acesso em: 11 abr. 2020.

SOUZA, J. L. d.; ESCOBEDO, J. F.; TORNERO, M. T. T. Albedo e estimativas do saldo de radiação em feijão-vagem sob cobertura de plástico e ambiente externo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), p. 1763–1774, 1999. Disponível em: <<https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/5500>>. Acesso em: 03 ago. 2019.

SPANGGAARD, H.; KREBS, F. C. A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Elsevier, v. 83, n. 2-3, p. 125–146, 2004. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927024804000923>>. Acesso em: 21 jul. 2019.

SPENCER, J. A comparison of methods for estimating hourly diffuse solar radiation from global solar radiation. **Solar Energy**, Elsevier, v. 29, n. 1, p. 19–32, 1982.

STÜKER, E. et al. Comparação entre os dados de vento das reanálises meteorológicas era-interim e cfsr com os dados das estações automáticas do inmet no rio grande do sul. **Ciência e Natura**, v. 38, p. 284–290, 2016. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/pdf/4675/467547689046.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2020.

URRACA, R. et al. Evaluation of global horizontal irradiance estimates from era5 and cosmo-rea6 reanalyses using ground and satellite-based data. **Solar Energy**, Elsevier, v. 164, p. 339–354, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X18301920>>. Acesso em: 13 jun. 2020.

VIEIRA, L.; PICULLI, F. J. Meteorologia e climatologia agrícola. **Cidade Gaúcha–Pr: Universidade Estadual de Maringá**, 2009. Disponível em: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/60198393/ag_meteorologia_livro20190803-99299-7ytuzy.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2020.