

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS ITUMBIARA
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO



MATEUS MESSIAS PALHANO

**PROPOSTA DE MODELO COMPUTACIONAL PARA A IRRADI-
AÇÃO SOLAR MÉDIA NA MICRORREGIÃO DE MEIA PONTE DO
SUL DO ESTADO DE GOIÁS**

ITUMBIARA

2025



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Mateus Messias Palhano

Matrícula: 20181040100113

Título do Trabalho: Proposta de modelo computacional para irradiação solar média na microrregião de Meia Ponte do sul do estado de Goiás

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara-GO, 28/08/2025.

Local Data



Documento assinado digitalmente

MATEUS MESSIAS PALHANO

Data: 08/10/2025 20:15:59-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

MATEUS MESSIAS PALHANO

**PROPOSTA DE MODELO COMPUTACIONAL PARA A IRRADI-
AÇÃO SOLAR MÉDIA NA MICRORREGIÃO DE MEIA PONTE DO
SUL DO ESTADO DE GOIÁS**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Controle e Automação, do Instituto Federal de Goiás - Câmpus Itumbiara, como requisito para aprovação na disciplina de trabalho de conclusão de curso.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Gabriel Gustavo
Leonardo Zamobolini Vicente

ITUMBIARA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

P161 Palhano, Mateus Messias

Proposta de modelo computacional para a irradiação solar média na microrregião de meia ponte do sul do estado de Goiás. -- Itumbiara, 2025.
37 p. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2025.

Orientadora: Prof. Dr. Bruno Gabriel Gustavo Leonardo Zambolini Vicente.

1.Energia solar. 2.Inteligência computacional. 3.Modelagem matemática aplicada à resolução de problemas nas Engenharias. I. Título. II. Palhano, Mateus Messias. III. Vicente, Bruno Gabriel Gustavo Leonardo Zambolini. IV. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

CDD 621.39

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus Itumbiara
Bibliotecária: Marla de Souza Correia CRB-1/3011



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA

MATEUS MESSIAS PALHANO

**PROPOSTA DE MODELO COMPUTACIONAL PARA A IRRADIAÇÃO SOLAR MÉDIA NA MICRORREGIÃO DE MEIA PONTE
DO SUL DO ESTADO DE GOIÁS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Itumbiara, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em 22 de Agosto de 2025.

(Assinado Eletronicamente).

Prof. Dr. Bruno Gabriel Gustavo Leonardo Zambolini Vicente
Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara
Orientador

(Assinado Eletronicamente).

Prof. Dr. Diogo Soares Resende
Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara
Avaliador

(Assinado Eletronicamente)

Prof. Dr. Victor Régis Bernardeli
Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara
Avaliador

Documento assinado eletronicamente por:

- **Diogo Soares Resende**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 25/08/2025 16:14:49.
- **Victor Regis Bernardeli**, CHEFE - CD4 - ITU-DAA, em 25/08/2025 10:34:23.
- **Bruno Gabriel Gustavo Leonardo Zambolini Vicente**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 22/08/2025 15:53:11.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 21/08/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 682946

Código de Autenticação: 9e6997a4c9



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Avenida Furnas, nº 55, 55, Bairro Village Imperial, ITUMBIARA / GO, CEP 75524-010
(64) 2103-5622 (ramal: 5622)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a minha mãe Ivone que sempre me ajudou e a meu pai José que mesmo não estando entre nós sempre torceu por minha felicidade.

Ao meu Orientador Bruno por sua paciência, perseverança e seus conhecimentos que foram de grande importância para a conclusão desse projeto.

Aos professores do Instituto Federal de Goiás pela sua dedicação em transmitir seus conhecimentos e nos apoiarem nessa trajetória.

A todo o grupo técnico e administrativo do Câmpus Itumbiara, por virem a disponibilizar sua biblioteca, laboratórios e seu tempo a conclusão desta jornada.

RESUMO

Com a expansão do aproveitamento da energia solar, inúmeros projetos de pesquisa e setores profissionais passaram a utilizar bases de dados solarimétricas disponibilizadas pelo LABREN¹ do INPE². Entretanto, devido ao formato dos arquivos e à organização interna das informações, a manipulação e a sistematização da extração desses dados apresentam desafios significativos. Observa-se, ainda, que muitos profissionais da área lidam diretamente com grandes volumes de dados para realizar estimativas iniciais. Diante desse cenário, o presente Trabalho de Conclusão de Curso propõe, implementa e discute modelos matemáticos para a estimativa da energia de irradiação direta, com foco na microrregião de Meia Ponte, no estado de Goiás, que abrange os municípios de Itumbiara, Rio Quente e Caldas Novas, destaques estaduais no aproveitamento da energia solar. As superfícies geradas serão desenvolvidas pelo método dos mínimos quadrados, adaptado para representar funções de segundo, terceiro, quarto, quinto e sexto graus.

Palavras-chave: Energia solar, modelagem matemática, modelo computacional, região de Meia Ponte.

¹ LABREN: Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia.

² INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

ABSTRACT

With the expansion of solar energy utilization, numerous research projects and professional sectors have begun to use solarimetric databases provided by LABREN of INPE. However, due to the file formats and the internal organization of the information, the handling and systematization of data extraction present significant challenges. Furthermore, many professionals in the field deal directly with large volumes of data to carry out preliminary estimates. In this context, the present Undergraduate Thesis proposes, implements, and discusses mathematical models for estimating direct solar irradiation energy, focusing on the Meia Ponte microregion in the state of Goiás, which includes the municipalities of Itumbiara, Rio Quente, and Caldas Novas, statewide references in solar energy utilization. The generated surfaces will be developed using the least squares method, adapted to represent second-, third-, fourth-, fifth-, and sixth-degree functions.

Keywords: Solar energy, mathematical modeling, computational model, Meia Ponte region.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Rede de estações solarimétricas em operação do Brasil em 2021.	12
Figura 2- Disposição das EM automáticas da mesorregião sul de Meia Ponte.	15
Figura 3- Superfícies de respostas médias.	15
Figura 4– Método da estrela.	18
Figura 5– Balanço Energético da Terra.	20
Figura 6– Mapa com a distribuição das ID's.	21
Figura 7 – construção da matriz X.	26
Figura 8 – Fluxograma do Código referente ao EMQ, desvio padrão, erro de fronteira e interior.	27
Figura 9 - Superfícies de segundo grau referente ao mês de agosto.	28
Figura 10 - Erro apresentado no metodo SVD	29
Figura 11 – Superfície dos dados iniciais do mês de janeiro.	32
Figura 12 – Gráfico comparativo do erro, entre inversa e Pseudo-inversa.	32
Figura 13 – Gráfico comparativo do erro de fronteira, entre inversa e Pseudo-inversa.	33
Figura 14 – Gráfico comparativo do erro interno, entre inversa e Pseudo-inversa.	33
Figura 15 – Gráfico comparativo do desvio padrão, entre inversa e Pseudo-inversa.	34
Figura 16 - Superfície original do mês de Abril.	35
Figura 17 - Superfície original do mês de Maio.	36
Figura 18 - Superfície original do mês de Junho.	37
Figura 19 - Superfície original do mês de Julho.	38
Figura 20 - Superfície original do mês de Agosto.	39
Figura 21 - EMQ dos meses de Abril a Agosto.	41
Figura 22 - Erro de fronteira de Abril a Agosto.	42
Figura 23 - Erro interno de Abril a Agosto.	43
Figura 24 - Desvio padrão de Abril a Agosto.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lista de EM convencionais da mesorregião sul de Meia Ponte.	14
Tabela 2 – Lista de EM automáticas da mesorregião sul de Meia Ponte.	14
Tabela 3– Tabela referente as cidades de Meia Ponte.	22
Tabela 4 - Tabela referente as ID's de Meia Ponte	23
Tabela 5– Tabela referente à disposição geográfica dos ID's	23
Tabela 6 – Tabela referente à disposição geográfica dos ID's para o polinômio de grau 2.	24
Tabela 7 – Tabela referente à disposição geográfica dos ID's para os polinômios de grau maior que 2.	25
Tabela 8 – Termos dependentes e independentes da função de segundo grau referentes ao mês de agosto.	25
Tabela 9 – Inversa.	29
Tabela 10 – SVD.	30
Tabela 11 – Pseudo inversa.	31
Tabela 12 – Resultados do mês de Abril.	36
Tabela 13 – Resultados do mês de Maio.	37
Tabela 14 – Resultados do mês de Junho.	38
Tabela 15 – Resultados do mês de Julho.	39
Tabela 16 – Resultados do mês de Agosto.	40

LISTA DE SIGLAS

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

CRESEESB – Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito

ES – Estação Solarimétrica

EM – Estações Meteorológicas

LABREN – Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia

MMQ – Método dos Mínimos Quadrados

TSI – Irradiância Solar Total

SSI – Irradiância Solar Espectral

EMQ – erro médio quadrático

RMSE – Mean Squared Error

ID – identity ou identidade

IDE – Ambiente de Desenvolvimento Integrado

SVD – decomposição em valores singulares

IA – Inteligência artificial

LISTA DE SÍMBOLOS

Km – Quilometro

KWh/m²dia – Quilo Watt-hora por metro quadrado por dia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS (MMQ)	17
2.2	MÉTODO DA ESTRELA DE DISPOSIÇÃO DE PONTOS	17
2.3	POLINÔMIOS	18
2.4	IRRADIAÇÃO SOLAR	19
2.5	ERRO MÉDIO QUADRÁTICO (EMQ)	20
3	METODOLOGIA	20
3.1	OBTENÇÃO DE DADOS	21
3.2	MONTAGEM DAS PLANILHAS	21
3.3	POLINÔMIOS E SUAS MATRIZES	23
3.4	DESENVOLVIMENTO DOS CÓDIGOS	25
3.4.1	ERRO MÍNIMO QUADRADO E DESVIO PADRÃO	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
5	CONCLUSÃO	45
6	TRABALHOS FUTUROS	46
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

As fontes renováveis experienciou uma expansão acelerada da diversificação de sistemas distribuídos, especialmente na geração (REN21, 2016). De acordo com os dados disponibilizados pela ABSOLAR (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica), aproveitamento de energia solar vem a ter um real crescimento, que em mesmo passando por tempos de pandemia do coronavírus e em 2024 alcançou a marca de 50GW de capacidade instalada. Ainda segundo a ABSOLAR, a potência instalada no Brasil vem a representar 20,7% da capacidade instalada da matriz elétrica brasileira sendo assim a segunda maior fonte de geração de energia do país (PORTAL SOLAR, 2024).

De acordo com Pereira et al. (2017), a expansão sustentada impõe o desafio dos custos de instalação e manutenção relativos ao aumento do número de estações solarimétricas requeridas, cuja a rede em operação no Brasil pode ser vista na Figura 1 e na Figura 2, para que seja possível a medição de componentes da radiação solar (direta, difusa e albedo), a serem disponibilizadas em um banco de dados do setor. Esse repositório é de suma importância para fundamentar adequadamente os cálculos de dimensionamento de sistemas solares.

Figura 1 - Rede de estações solarimétricas em operação do Brasil em 2021.



Fonte: Adaptado de <https://mapas.inmet.gov.br/>

Atualmente, o método padrão utilizado para a execução destes cálculos consiste em acessar as tabelas fornecidas pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) ou pelo website da CRESEESB (Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito) utilizando a latitude e longitude como referência para se adquirir a irradiação solar durante os meses do ano ou em um mês específico.

A fim de se tornar ágil o processo de dimensionamento, diversos aplicativos estão disponíveis para o cálculo completo de parâmetros e estimativa de sistemas de instalação, entre eles o iSolergo, SolarCT, EStimate. Para tal, esses aplicativos fazem uso dos bancos de dados estabelecidos, que se apoiam nas estimativas da malha solarimétrica instalada (conforme disposto na Figura 1). Entretanto, conforme destaca Martins e Pereira (2011), dados obtidos para a maioria das localidades são interpolações entre essas estações solarimétricas, tipicamente separadas por dezenas a centenas de quilômetros, sendo necessário o estudo regionalizado dos dados para a construção de modelos computacionais para melhor refinamento das estimativas, conforme o abordado em Lima (2015).

Frente ao exposto e ponderando a necessidade de regionalização, o presente trabalho de graduação tem por objetivo construir um modelo computacional baseado na aplicação do método de mínimos quadrados para a irradiação solar direta para a microrregião de Meia Ponte, a exemplo de trabalhos como Lima (2015), Mendes et al (2017) e Oliveira (2017), abrangendo cidades de destaque, como exemplo Itumbiara, Morrinhos, Caldas Novas e Rio Quente, de forma a subsidiar uma opção para as estimativas para os setores interessados.

Conforme o descrito anteriormente, além da necessidade de regionalização de um modelo para a irradiação solar, destaca-se que a microrregião de Meia Ponte, na mesorregião do Sul Goiano, que conta com duas estações meteorológicas automáticas uma em Itumbiara e outra em Morrinhos, sendo que em Goiás tem-se trinta e cinco estações meteorológicas (EM) entre elas nove estações convencionais e vinte e seis estações automáticas, conforme pode-se observar na Tabela 1 e 2 e na Figura 2, estas tabelas mostram as EM em operação no Brasil, porém em destaque as estações de Goiás e pertencentes a mesorregião sul de Meia Ponte INMET 2025. Apesar das estimativas por localidades serem fornecidas, estudos como de Mendes et al (2017) apontam a necessidade de se contar com modelos capazes de serem atualizados com periodicidade, combinando os dados de interpolação fornecidos com as leituras diretas, provenientes das medições. Em LACTEC/INPE (2020), projeto de Pesquisa e Desenvolvimento financiado pela Petrobrás, são desenvolvidos métodos para se estabelecer estratégias de menor custo para esse

propósito, evidenciando o interesse nesse tipo de projeto e sendo um dos fatores de motivação para a presente proposta.

Tabela 1 – Lista de EM convencionais da mesorregião sul de Meia Ponte.

27	QUIXERAMOBIM	CE	Operante	-5,17305554	-39,28722221	227,33	31/12/1895	82586		
28	BRASILIA	DF	Operante	-15,78972221	-47,92583332	1161,42	11/09/1961	83377		
29	ARAGARCAS	GO	Operante	-15,9025	-52,24527777	327,03	18/07/1970	83368		
30	CATALAO	GO	Operante	-18,17027777	-47,95805555	857,98	31/12/1912	83526		
31	FORMOSA	GO	Operante	-15,54916666	-47,33888888	938,68	31/12/1924	83379		
32	GOIANIA	GO	Operante	-16,67305554	-49,26388888	748,53	10/07/1937	83423		
33	IPAMERI	GO	Operante	-17,72444443	-48,17194443	778,14	09/02/1977	83522		
34	JATAI	GO	Operante	-17,92361111	-51,71749999	669,84	23/11/1978	83464		
35	PIRENOPOLIS	GO	Operante	-15,85472222	-48,96611111	766,92	16/02/1977	83376		
36	POSSE	GO	Operante	-14,08916666	-46,36666666	830,35	03/08/1975	83332		
37	RIO VERDE	GO	Operante	-17,78527777	-50,96472222	780,04	31/12/1970	83470		
38	BACABAL	MA	Operante	-4,21805554	-44,77583332	26,6	14/08/1976	82460		
39	BALSAS	MA	Operante	-7,52944443	-46,04638888	263,48	13/08/1976	82768		
40	CAROLINA	MA	Operante	-7,33722221	-47,45972222	182,94	31/12/1912	82765		

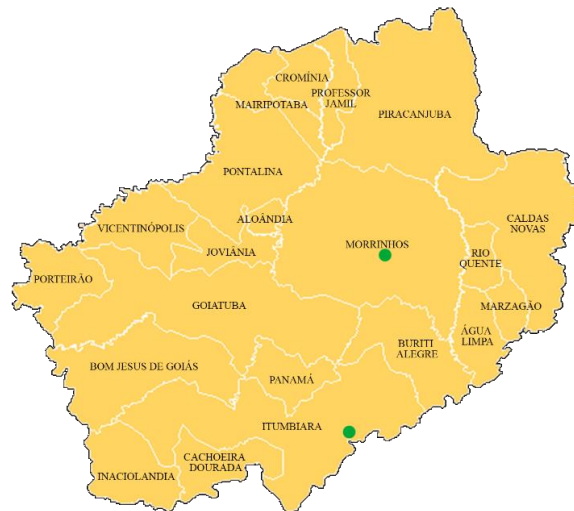
Fonte: Adaptado de <https://portal.inmet.gov.br/paginas/catalogoman#>

Tabela 2 – Lista de EM automáticas da mesorregião sul de Meia Ponte.

116	VITORIA	ES	Operante	-20,2708	-40,30583333	9	30/10/2006	A612		
117	ALTO PARAISO DE GOIAS	GO	Operante	-14,1331	-47,52333332	1264,7	03/06/2007	A024		
118	ARAGARCAS	GO	Operante	-15,9028	-52,24527777	327,35	12/07/2007	A013		
119	CAIAPONIA	GO	Operante	-16,9669	-51,81749999	740,1	20/05/2007	A023		
120	CATALAO	GO	Operante	-18,1548	-47,927614	900,72	30/01/2008	A034		
121	CRISTALINA	GO	Operante	-16,785	-47,61305555	1211,08	13/12/2007	A036		
122	CRISTALINA (FAZENDA SANTA MONICA)	GO	Operante	-16,3994	-47,62583332	932	24/01/2018	A056		
123	EDEIA	GO	Operante	-17,3369	-49,91472222	608	25/08/2017	A029		
124	GOIANESIA	GO	Operante	-15,2203	-48,98999999	667,01	01/06/2007	A022		
125	GOIANIA	GO	Pane	-16,6428	-49,22027777	727,3	28/05/2001	A002		
126	GOIAS	GO	Operante	-15,9397	-50,14138888	512,86	17/07/2007	A014		
127	IPORA	GO	Operante	-16,4231	-51,14888888	610,41	23/06/2013	A028		
128	ITAPACI	GO	Operante	-14,9797	-49,53944444	551	02/02/2007	A015		
129	ITUMBIARA	GO	Operante	-18,4097	-49,19194444	491,17	31/10/2007	A035		
130	JATAI	GO	Operante	-17,9236	-51,71749999	670,08	22/05/2007	A016		
131	LUZIANIA	GO	Operante	-16,2606	-47,96694443	1000,82	20/10/2006	A012		
132	MINEIROS	GO	Pane	-17,4547	-52,60111111	862	23/11/2007	A026		
133	MONTE ALEGRE DE GOIAS	GO	Operante	-13,2536	-46,89027777	552	06/06/2007	A032		
134	MORRINHOS	GO	Operante	-17,745	-49,10166666	751,09	24/05/2001	A003		
135	PARAUNA	GO	Operante	-16,9625	-50,42555554	678,74	28/03/2008	A027		
136	PIRES DO RIO	GO	Operante	-17,3042	-48,28416666	757,27	11/10/2007	A033		
137	PORANGATU	GO	Operante	-13,3094	-49,11749999	365	03/06/2001	A005		
138	POSSE	GO	Operante	-14,0892	-46,36638888	830	17/04/2007	A017		
139	RIO VERDE	GO	Operante	-17,7853	-50,965	780,11	16/05/2007	A025		
140	SAO MIGUEL DO ARAGUAIA	GO	Operante	-12,8206	-50,33583333	210	28/06/2017	A031		
141	SAO SIMAO	GO	Operante	-18,9692	-50,63333333	492,45	14/07/2006	A011		
142	SILVANIA	GO	Operante	-16,6797	-48,61805554	952	07/10/2010	A037		
143	ALTO PARNAIBA	MA	Pane	-9,10833	-45,93194443	283,69	02/06/2008	A223		

Fonte: Adaptado de <https://portal.inmet.gov.br/paginas/catalogoaut#>

Figura 2- Disposição das EM automáticas da mesorregião sul de Meia Ponte.

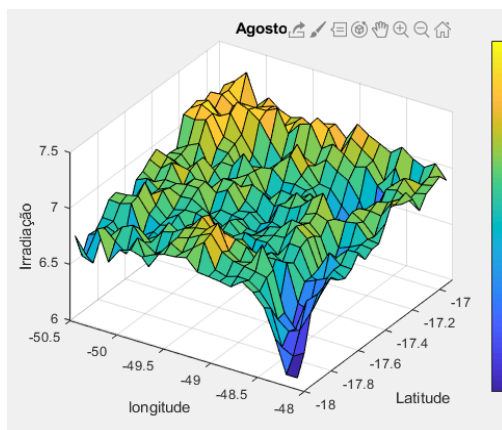


Fonte: Adaptado de <https://www.diretorioderuas.com/BR/Goias/Mesorregiao-Sul-Goiano/Microrregiao-De-Meia-Ponte/>

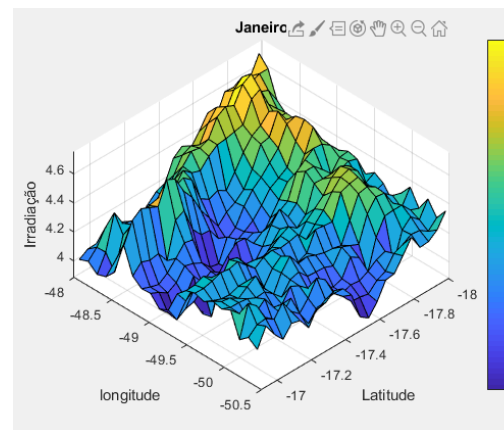
1.1 OBJETIVOS

Mediante a problemática investigada e fazendo uso dos dados disponíveis no site da LABREN (Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia) pode-se adquirir o conjunto de dados médio mensal do Brasil, com foco na mesorregião sul de goiás e seus arredores pode-se obter superfícies distintas e irregulares como exemplo nos meses de agosto e janeiro como pode-se observar na Figura 3a e 3b.

Figura 3- Superfícies de respostas médias.



- a) Superfície de resposta média obtida pelo modelo na microrregião de Meia Ponte – Agosto.



- b) Superfície de resposta média obtida pelo modelo na microrregião de Meia Ponte – Janeiro.

Fonte: Acervo dos autores.

No sentido dessa investigação, o trabalho se justifica pelo fato de propor a construção de um modelo computacional para o cenário regional de Meia Ponte, o qual conta com cidades que demonstram forte vocação para o aproveitamento da energia solar, como Itumbiara, uma das líderes no estado em aproveitamento fotovoltaico, quanto Rio Quente e Caldas Novas, com aproveitamento termo solar voltado para o turismo e Morrinhos, no setor agropecuário.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentado todo o embasamento teórico utilizado para o desenvolvimento deste trabalho no intuito de vir a detalhar sobre o método dos mínimos quadrados, método da estrela, polinômios, irradiação solar e estudo do erro.

2.1 MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS (MMQ)

O método dos mínimos quadrado consiste em um recurso de regressão linear para ajuste de curvas e superfícies, que diferentemente dos métodos de interpolação de dados que exige que a curva passe pelos pontos requisitados, o MMQ faz com que a curva venha a se ajustar de modo que passe próximo aos pontos requisitados. Contudo, o método requisita alguma curva já existente como em R2: retas, parábolas cubicas e quárticas, e para R3 tem-se planos, esferas, elipsoides, paraboloides, cilindros, hiperboloides e outros (MEOLA, 2007).

Para que este método funcione tem-se alguns requisitos a serem preenchidos, primeiramente deve-se obter dos os recurso para preencher a equação matricial $[b] = \{[X]^T [X]\}^{-1} [X]^T [Y]$, onde $[b]$ será a devolutiva dos termos dependentes e independentes da função, $[X]$ é a matriz dos pontos tendo suas coordenadas (x e y) substituídas na função e $[Y]$ é a matriz referente a resposta da função o eixo (z) (MEOLA, 2007).

$$[b] = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \quad [Y] = \begin{bmatrix} Y_0 \\ Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad [X] = \begin{bmatrix} 1 & x_0 & y_0 & x_0^2 & y_0^2 & x_0 * y_0 & \dots & x_0^n & y_0^n \\ 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & y_1^2 & x_1 * y_1 & \dots & x_1^n & y_1^n \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2^2 & y_2^2 & x_2 * y_2 & \dots & x_2^n & y_2^n \\ 1 & x_3 & y_3 & x_3^2 & y_3^2 & x_3 * y_3 & \dots & x_3^n & y_3^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & x_n^2 & y_n^2 & x_n * y_n & \dots & x_n^n & y_n^n \end{bmatrix}$$

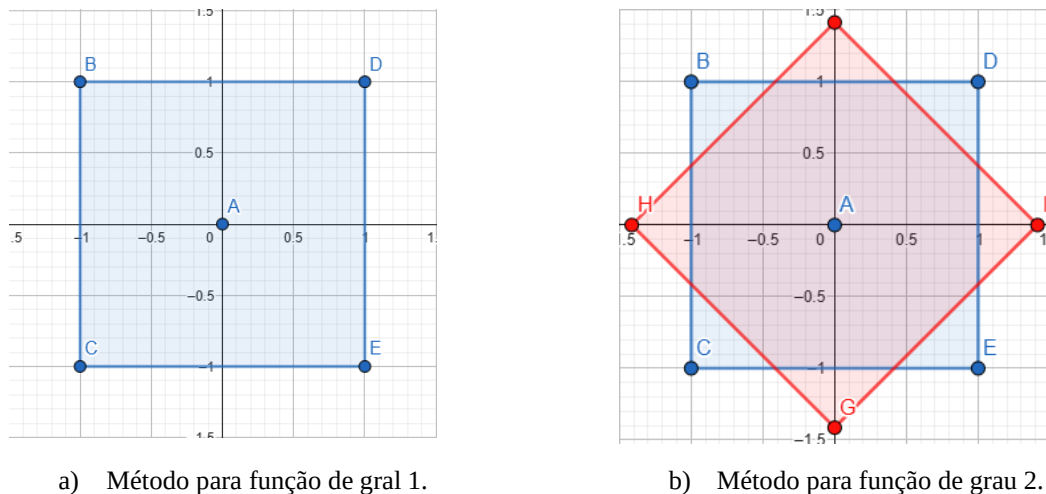
$$f(x, y) = b_0 + b_1 * y_0 + b_2 * x_0 + b_3 * x_0 * y_0 + b_4 * y_0^2 + b_5 * x_0^2 + \dots + b_n * y_0^n + b_{n+1} * x_0^n$$

2.2 MÉTODO DA ESTRELA DE DISPOSIÇÃO DE PONTOS

Este método consiste em estratégia de disposição de pontos no plano para coletar pontos para a construção do modelo, tendo sua origem em funções de primeiro grau no plano (x,y)

sendo composto por um quadrado onde seus pontos tem como modulo a $\sqrt{2}$ e incluindo o marco zero como pode ser observado na figura 4a, sistematizando a construção da matriz $[X]$ por conta de seus pontos conhecidos e transportar a função a origem cartesiana, com o aumento do grau da função (x,y) , este planejamento vem a acrescentar mais um quadrado idêntico ao anterior porem rotacionado em 45° do ponto central como pode-se observar na Figura 4b (MEOLA, 2007).

Figura 4– Método da estrela.



Fonte: Acervo dos autores.

2.3 POLINÔMIOS

Um polinômio como já visto anteriormente pode assumir formas conhecidas como uma reta, parábola, elipse entre outros do plano (x, y) ou até mesmo um paraboloide, elipsoide, hiperboloide e entre outros do plano (x, y, z) , porém existem diversas formas não conhecidas que são polinômios de grau variável, originários das funções da reta e do plano, conforme segue: (MEOLA, 2007).

- Função de primeiro grau:

$$f(x, y) = ax + by + c$$

- Função de segundo grau:

$$f(x, y) = (ax + by + c)^2 = a^2x^2 + b^2y^2 + 2acx + 2bcy + 2abxy + c^2$$

- Função de terceiro grau:

$$f(x, y) = (ax + by + c)^3 = a^3x^3 + b^3y^3 + 3a^2x^2c + 3b^2y^2c + 3a^2x^2by + 3axb^2y^2 + 3axc^2 + 3byc^2 + 6abcxy + c^3$$

- Função de quarto grau:

$$f(x, y) = (ax + by + c)^4 = a^4x^4 + b^4y^4 + 4a^3x^3c + 4b^3y^3c + 4axc^3 + 4a^3x^3by + 4axb^3y^3 + 6a^2x^2c^2 + 6b^2y^2c^2 + 4byc^3 + c^4 + 6a^2x^2b^2y^2 + 12a^2x^2bcy + 6axb^2y^2c + 12abxyc^2 + 6ab^2cxy^2$$

- Função de quinto grau:

$$f(x, y) = (ax + by + c)^5 = a^5x^5 + 5a^4bx^4y + 10a^3b^2x^3y^2 + 10a^2b^3x^2y^3 + 5ab^4xy^4 + b^5y^5 + 5ca^4x^4 + 20ca^3bx^3y + 30ca^2b^2x^2y^2 + 20cab^3xy^3 + 5cb^4y^4 + 10c^2a^3x^3 + 30c^2a^2bx^2y + 30c^2ab^2xy^2 + 10c^2b^3y^3 + 10c^3a^2x^2 + 20c^3abxy + 10c^3b^2y^2 + 5c^4ax + 5c^4by + c^5$$

- Função de sexto grau:

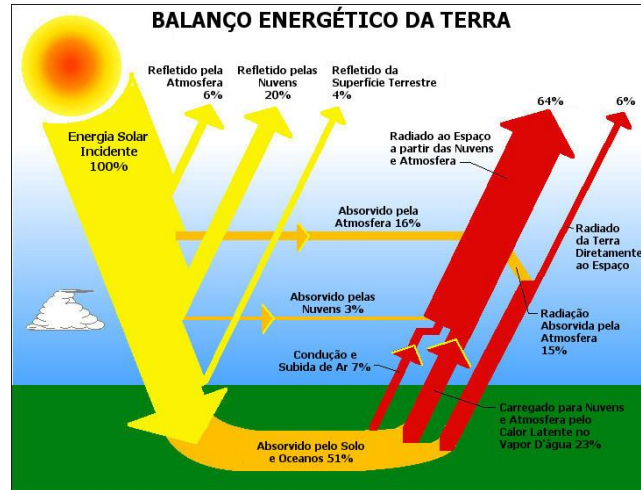
$$f(x, y) = (ax + by + c)^6 = a^6x^6 + 6a^5bx^5y + 15a^4b^2x^4y^2 + 20a^3b^3x^3y^3 + 5a^2b^4x^2y^4 + 6ab^5xy^5 + b^6y^6 + 6ca^5x^5 + 30ca^4bx^4y + 60ca^3b^2x^3y^2 + 60ca^2b^3x^2y^3 + 30cab^4xy^4 + 6cb^5y^5 + 15c^2a^4x^4 + 60c^2a^3bx^3y + 90c^2a^2b^2x^2y^2 + 60c^2ab^3xy^3 + 15c^2b^4y^4 + 20c^3a^3x^3 + 60c^3a^2bx^2y + 60c^3ab^2xy^2 + 20c^3b^3y^3 + 15c^4a^2x^2 + 30c^4abxy + 15c^4b^2y^2 + 6c^5ax + 6c^5by + c^6$$

2.4 IRRADIAÇÃO SOLAR

A irradiação solar vem a ser um fluxo de energia provinda do sol e transmitida em forma de radiação eletromagnética, dês de meados da década de 70 a irradiação solar passou de ser considerada uma constante, 1365W/m², para uma medida variável em minutos ou décadas, pode ser denominada em Irradiância Solar Total (TSI - *Total Solar Irradiance*) podendo ser descrita como potência total da energia provinda do sol e Irradiância Solar Espectral (SSI - *Solar Spectral Irradiance*) é a distribuição da energia solar de diferentes comprimentos de onda em aspecto eletromagnético (GÓMEZ, 2018).

Essa mesma radiação solar ao chegar na atmosfera e atravessá-la, irá sofrer com alguns processos de interação com seus componentes, sendo refletido, sofrendo difusão e absorção, como podemos observar na Figura 5, assim a irradiação será dividida em direta que é aquela que chega até a superfície vindo diretamente do sol, difusa é aquela que é dispersada ao longo da trajetória e a global é a soma das duas irradiações anteriores (NETO, 2022).

Figura 5– Balanço Energético da Terra.



Fonte: Adaptado de <https://recursosolar.geodesign.com.br/energiasolar.html>

2.5 ERRO MÉDIO QUADRÁTICO (EMQ)

O método do erro médio quadrático faz uso do quadrado dos resíduos da amostra coletada no caso do trabalho em questão seria a diferença pontual entre os valores reais e a curva calculada, portanto o RMSE (*Root Mean Squared Error*) vem a trabalhar em cima do valor absoluto se adequando ao objetivo proposto, o valor que se pode adquirir deste método é resultado da raiz quadrada do somatório dos resíduos (Δx) ao quadrado divididos pelo número de amostras (N), mas para delimitar ou usar como referência se pode fazer o uso do desvio padrão (S_{RSME}) sendo o resultado do somatório do quadrado da diferença entre o resíduo (Δx) e o valor RSME tudo isso dividido por $N-1$, para complementar o conjunto de análise será feito o erro de fronteira e o erro de interior ou seja será calculado o erro nas bordas da superfícies e o erro na parte interior da superfície e compará-los para saber se a mais erro nas bordas ou na parte interna (VIERA; GENRO 2013).

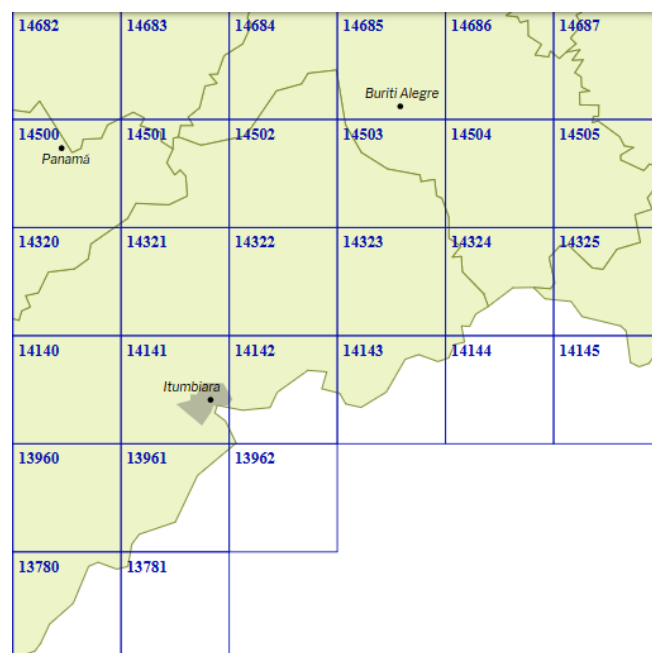
$$RSME_{\Delta x} = \sqrt{\sum_i^N \frac{\Delta x_i^2}{N}} \quad S_{RSME_{\Delta x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (|\Delta x|_i - RSME_{\Delta x})^2}{N - 1}}$$

3 METODOLOGIA

3.1 OBTENÇÃO DE DADOS

Para que possa ser obtido os dados de irradiação solar de Meia Ponte, se deve acessar o banco de dados do LABREN (Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia) que vem a fornecer inúmeras informações em relação aos tipos de irradiação solar como a global horizontal, plano inclinado, difusa, PAR e a que será utilizada a direta normal, essas informações vem a serem indexadas por ID's (*identity* ou identidade) referentes a uma área de aproximadamente 10km x 10km ou para uma resolução espacial de 0,1° x 0,1° como pode-se ver na Figura 6, assim cada ID irá possuir as informações referentes a cada tipo de irradiação e sua variação média mensal ao decorrer dos meses do ano.

Figura 6–Mapa com a distribuição das ID's.



Fonte: Adaptado de https://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017_GO.html

3.2 MONTAGEM DAS PLANILHAS

Com as informações em mãos pode-se montar e organizar tabelas que visam a facilitar a visualização e a programação do projeto, tabelas as quais irão ter origem da base de dados do LABREN que em uma escala que cobre totalmente o Brasil comporta 72272 ID's, esta base será dividida em as cidades pertencentes a região de Meia Ponte como pode-se ver na Tabela 1, na tabela de ID's referentes a região estudada contemplando 213 ID's e que ao fazer o balanço das informações pode se observar que nesta região em agosto tem-se um pico de irradiação como pode-se observar na Tabela 2, para que possa ser otimizada a programação foi-se construída uma tabela que vem a representar a região em que os ID's ocupem as suas posições geográficas como vemos na Tabela 3, com as necessidades que possam surgir as tabelas anteriores foram adaptadas e tiveram incrementos em seus dados.

Tabela 3– Tabela referente as cidades de Meia Ponte.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
	ID	Cidade	Latitude	longitude	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	14141	Itumbiara	-18,422	-49,215	4,427	4,438	4,116	5,335	5,705	5,748	5,954	6,782	5,027	4,516	4,203	4,514
2	15437	Caldas Novas	-17,745	-48,625	4,193	4,687	4,172	5,522	5,871	5,880	6,087	6,861	5,146	4,654	3,887	4,113
3	15432	Morrinhos	-17,721	-49,108	4,183	4,582	4,374	5,567	5,992	5,814	5,990	6,879	5,127	4,644	3,989	4,076
4	14864	Goiatuba	-18,011	-49,369	4,091	4,396	4,101	5,335	5,766	5,817	5,912	6,730	5,039	4,596	4,042	4,075
5	14496	Bom Jesus de Goiás	-18,203	-49,734	4,256	4,324	4,010	5,316	5,670	5,768	5,967	6,787	4,958	4,467	4,028	4,164
6	16202	Piracanjuba	-17,296	-49,011	4,206	4,480	4,248	5,489	5,947	5,913	5,968	6,839	5,148	4,675	3,852	4,041
7	15810	Pontalina	-17,520	-49,444	4,173	4,469	4,446	5,521	5,893	5,602	5,800	6,689	5,008	4,692	3,962	4,044
8	14685	Buriti Alegre	-18,152	-49,043	3,934	4,551	4,099	5,534	5,863	5,989	5,977	6,824	4,906	4,636	4,010	4,001
9	15425	Vicentinópolis	-17,722	-49,791	4,355	4,730	4,384	5,503	5,951	5,698	5,972	6,872	5,012	4,672	4,120	4,184
0	13959	Cachoeira Dourada	-18,477	-49,493	4,236	4,570	4,252	5,519	5,736	5,866	5,858	6,791	4,786	4,630	4,363	4,289
1	15238	Joviânia	-17,805	-49,615	4,166	4,431	4,173	5,479	5,837	5,739	5,906	6,815	4,972	4,641	4,039	4,111
2	13954	Inaciolândia	-18,470	-49,987	4,509	4,613	4,337	5,405	5,748	5,772	5,878	6,786	5,039	4,684	4,435	4,578
3	15247	Rio Quente	-17,780	-48,768	4,082	4,622	4,331	5,581	6,011	6,046	6,216	6,988	5,196	4,685	4,048	4,000
4	15233	Porteirão	-17,815	-50,165	4,391	4,621	4,455	5,524	6,017	5,910	6,049	6,979	4,953	4,681	4,131	4,206
5	16199	Crominia	-17,289	-49,380	4,153	4,440	4,278	5,494	5,895	5,886	6,045	6,902	5,120	4,630	3,827	4,029
6	16200	Professor Jamil	-17,251	-49,237	4,158	4,428	4,296	5,524	5,993	5,797	6,045	6,781	5,111	4,649	3,828	4,056
7	14500	Panamá	-18,165	-49,288	4,026	4,454	4,076	5,471	5,834	5,882	5,945	6,722	4,929	4,580	4,055	4,141
8	16198	Maripotaba	-17,281	-49,493	4,149	4,445	4,340	5,491	5,856	5,932	6,040	6,894	5,089	4,631	3,882	3,993
9	14871	Marzagão	-17,976	-48,646	4,111	4,696	4,238	5,571	5,962	5,931	6,042	6,750	5,247	4,712	4,115	4,057
0	15429	Aloândia	-17,716	-49,484	4,284	4,618	4,438	5,552	5,867	5,879	5,966	6,745	5,037	4,702	4,104	4,140
1	14688	Água Limpa	-18,072	-48,765	4,126	4,656	4,331	5,639	5,942	5,967	6,035	6,615	5,047	4,729	4,103	4,168

Fonte: Acervo dos autores.

Tabela 4 - Tabela referente as ID's de Meia Ponte

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	ID	longitude	Latitude	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
192	16200	-49,249	-17,301	4,158	4,428	4,296	5,524	5,993	5,797	6,045	6,781	5,111	4,649	3,828	4,056
193	16201	-49,149	-17,301	4,223	4,437	4,264	5,494	5,967	5,851	5,983	6,762	5,085	4,649	3,844	4,014
194	16202	-49,049	-17,301	4,206	4,480	4,248	5,489	5,947	5,913	5,968	6,839	5,148	4,675	3,852	4,041
195	16203	-48,949	-17,301	4,120	4,493	4,198	5,393	5,907	5,915	6,067	6,869	5,151	4,716	3,819	4,001
196	16204	-48,849	-17,301	4,178	4,559	4,202	5,474	5,893	5,928	6,144	6,904	5,160	4,730	3,814	3,939
197	16205	-48,749	-17,301	4,226	4,601	4,156	5,471	5,872	5,988	6,186	6,940	5,154	4,744	3,752	3,950
198	16390	-49,649	-17,201	4,188	4,459	4,460	5,536	5,854	5,945	6,052	6,905	5,199	4,681	3,957	4,011
199	16391	-49,549	-17,201	4,073	4,333	4,364	5,477	5,881	6,041	6,006	6,881	5,109	4,616	3,831	3,952
200	16392	-49,449	-17,201	4,052	4,291	4,222	5,447	5,806	6,040	6,034	6,874	5,095	4,545	3,714	3,881
201	16393	-49,349	-17,201	4,079	4,306	4,172	5,501	5,843	6,003	6,017	6,803	5,146	4,525	3,675	3,936
202	16394	-49,249	-17,201	4,065	4,388	4,231	5,468	5,899	5,942	6,096	6,898	5,152	4,644	3,718	3,953
203	16395	-49,149	-17,201	4,148	4,368	4,183	5,434	5,918	5,978	6,080	6,928	5,183	4,655	3,733	3,986
204	16396	-49,049	-17,201	4,200	4,426	4,194	5,471	5,914	6,004	6,067	6,926	5,117	4,697	3,787	4,007
205	16397	-48,949	-17,201	4,231	4,431	4,172	5,437	5,820	6,021	6,062	6,770	5,172	4,656	3,775	4,021
206	16398	-48,849	-17,201	4,142	4,484	4,163	5,505	5,857	6,077	6,141	6,915	5,177	4,669	3,770	3,865
207	16399	-48,749	-17,201	4,157	4,500	4,114	5,499	5,830	6,170	6,261	6,973	5,233	4,706	3,697	3,841
208	16586	-49,449	-17,101	4,060	4,232	4,239	5,404	5,760	6,091	6,019	6,838	5,113	4,577	3,683	3,822
209	16587	-49,349	-17,101	4,068	4,271	4,203	5,483	5,870	6,072	6,067	6,836	5,095	4,572	3,668	3,830
210	16588	-49,249	-17,101	4,046	4,338	4,169	5,429	5,885	6,073	6,080	6,879	5,118	4,592	3,637	3,812
211	16589	-49,149	-17,101	4,094	4,314	4,184	5,455	5,875	6,061	6,066	6,985	5,145	4,625	3,710	3,875
212	16590	-49,049	-17,101	4,209	4,405	4,154	5,473	5,849	6,041	6,020	6,919	5,184	4,655	3,794	4,009
213	16591	-48,949	-17,101	4,255	4,439	4,137	5,367	5,799	6,130	6,091	6,827	5,178	4,649	3,761	4,023
214	16592	-48,849	-17,101	4,151	4,429	4,109	5,486	5,831	6,167	6,125	6,792	5,227	4,661	3,719	3,837
215	total			901,009	970,317	906,876	1172,537	1249,811	1248,998	1272,977	1449,542	1070,249	990,758	865,484	886,6
216	%			62,15819%	66,93956%	62,56293%	80,89017%	86,22110%	86,16501%	87,81926%	100,00000%	73,83360%	68,34973%	59,70741%	61,16415%

Fonte: Acervo dos autores.

Tabela 5– Tabela referente à disposição geográfica dos ID's

	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1						16586	16587	16588	16589	16590	16591	16592				
2				16390	16391	16392	16393	16394	16395	16396	16397	16398	16399			
3				16196	16197	16198	16199	16200	16201	16202	16203	16204	16205			
4				16002	16003	16004	16005	16006	16007	16008	16009	16010	16011			
5				15808	15809	15810	15811	15812	15813	15814	15815	15816	15817	15818	15819	
6	15613	15614	15615	15616	15617	15618	15619	15620	15621	15622	15623	15624	15625	15626	15627	15628
7	15424	15425	15426	15427	15428	15429	15430	15431	15432	15433	15434	15435	15436	15437	15438	15439
8	15235	15236	15237	15238	15239	15240	15241	15242	15243	15244	15245	15246	15247	15248	15249	
9	15045	15046	15047	15048	15049	15050	15051	15052	15053	15054	15055	15056	15057	15058	15059	
10	14858	14859	14860	14861	14862	14863	14864	14865	14866	14867	14868	14869	14870	14871	14872	
11	14676	14677	14678	14679	14680	14681	14682	14683	14684	14685	14686	14687	14688	14689	14690	
12	14494	14495	14496	14497	14498	14499	14500	14501	14502	14503	14504	14505	14506			
13	14314	14315	14316	14317	14318	14319	14320	14321	14322	14323	14324	14325				
14	14134	14135	14136	14137	14138	14139	14140	14141	14142	14143	14144					
15	13954	13955	13956	13957	13958	13959	13960	13961	13962							
16	13774	13775	13776	13777	13778	13779	13780	13781								

Fonte: Acervo dos autores.

3.3 POLINOMIOS E SUAS MATRIZES

Inicialmente para o polinômio de segundo grau se partiu da ideia de subdividir a região de Meia Ponte em sub regiões quadradas de 5x5 ID's fazendo assim a adição de novas informações nesta tabela como pode-se ver na Tabela 4 assim também gerando uma nova tabela geral com 325 ID's, com a finalidade de preencher as lacunas existente e executar o método dos mínimos quadrados fazendo a utilização do método da estrela assim gerando uma matriz X já conhecida e de fácil aplicação.

$$X = \begin{matrix} & x_1 & x_2 & x_1^2 & x_2^2 & x_1^2 x_2 \\ \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sqrt[2]{2} & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt[2]{2} & 0 & 2 & 0 \\ \sqrt[2]{2} & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & -\sqrt[2]{2} & 0 & 2 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Tabela 6 – Tabela referente à disposição geográfica dos ID's para o polinômio de grau 2.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1								16972	16973	16974	16975	16976	16977	16978	16979	16980	16981				
2								16778	16779	16780	16781	16782	16783	16784	16785	16786	16787				
3								16584	16585	16586	16587	16588	16589	16590	16591	16592	16593				
4								16390	16391	16392	16393	16394	16395	16396	16397	16398	16399				
5								16196	16197	16198	16199	16200	16201	16202	16203	16204	16205				
6		15996	15997	15998	15999	16000	16001	16002	16003	16004	16005	16006	16007	16008	16009	16010	16011	16012	16013	16014	16015
7		15802	15803	15804	15805	15806	15807	15808	15809	15810	15811	15812	15813	15814	15815	15816	15817	15818	15819	15820	15821
8		15610	15611	15612	15613	15614	15615	15616	15617	15618	15619	15620	15621	15622	15623	15624	15625	15626	15627	15628	15629
9		15421	15422	15423	15424	15425	15426	15427	15428	15429	15430	15431	15432	15433	15434	15435	15436	15437	15438	15439	15440
10		15232	15233	15234	15235	15236	15237	15238	15239	15240	15241	15242	15243	15244	15245	15246	15247	15248	15249	15250	15251
11	15041	15042	15043	15044	15045	15046	15047	15048	15049	15050	15051	15052	15053	15054	15055	15056	15057	15058	15059	15060	
12	14854	14855	14856	14857	14858	14859	14860	14861	14862	14863	14864	14865	14866	14867	14868	14869	14870	14871	14872	14873	
13	14672	14673	14674	14675	14676	14677	14678	14679	14680	14681	14682	14683	14684	14685	14686	14687	14688	14689	14690	14691	
14	14490	14491	14492	14493	14494	14495	14496	14497	14498	14499	14500	14501	14502	14503	14504	14505	14506	14507	14508	14509	
15	14310	14311	14312	14313	14314	14315	14316	14317	14318	14319	14320	14321	14322	14323	14324	14325	14326	14327	14328	14329	
16		14131	14132	14133	14134	14135	14136	14137	14138	14139	14140	14141	14142	14143	14144	14145					
17		13951	13952	13953	13954	13955	13956	13957	13958	13959	13960	13961	13962	13963	13964	13965					
18		13771	13772	13773	13774	13775	13776	13777	13778	13779	13780	13781	13782	13783	13784	13785					
19		13591	13592	13593	13594	13595	13596	13597	13598	13599	13600	13601	13602	13603	13604	13605					
20		13410	13411	13412	13413	13414	13415	13416	13417	13418	13419	13420	13421	13422	13423	13424					

Fonte: Acervo dos autores.

Para os outros graus de polinômios (3°,4°,5° e 6° grau) partiu-se da ideia de que possa substituir a latitude e longitude diretamente na matrix X e calculando um único polinômio para a região inteira, fazendo assim que só se saiba suas dimensões porem seu conteúdo varia de acordo com o grau definido para o cálculo, assim criando a necessidade de uma nova tabela de mapeamento como visto na Tabela 5 e uma nova tabela de 483 ID's e suas informações.

Dimensões das matrizes X:

- Terceiro grau;
483 linhas e 10 colunas ou X(483,10).
- Quarto grau;
483 linhas e 15 colunas ou X(483,15).
- Quinto grau;
483 linhas e 21 colunas ou X(483,21).
- Sexto grau.

483 linhas e 28 colunas ou X(483,28).

Tabela 7 – Tabela referente à disposição geográfica dos ID's para os polinômios de grau maior que 2.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	16966	16967	16968	16969	16970	16971	16972	16973	16974	16975	16976	16977	16978	16979	16980	16981	16982	16983	16984	16985	16986	16987	16988
2	16772	16773	16774	16775	16776	16777	16778	16779	16780	16781	16782	16783	16784	16785	16786	16787	16788	16789	16790	16791	16792	16793	16794
3	16578	16579	16580	16581	16582	16583	16584	16585	16586	16587	16588	16589	16590	16591	16592	16593	16594	16595	16596	16597	16598	16599	16600
4	16382	16383	16384	16385	16386	16387	16388	16389	16390	16391	16392	16393	16394	16395	16396	16397	16398	16399	16400	16401	16402	16403	16404
5	16188	16189	16190	16191	16192	16193	16194	16195	16196	16197	16198	16199	16200	16201	16202	16203	16204	16205	16206	16207	16208	16209	16210
6	15994	15995	15996	15997	15998	15999	16000	16001	16002	16003	16004	16005	16006	16007	16008	16009	16010	16011	16012	16013	16014	16015	16016
7	15800	15801	15802	15803	15804	15805	15806	15807	15808	15809	15810	15811	15812	15813	15814	15815	15816	15817	15818	15819	15820	15821	15822
8	15608	15609	15610	15611	15612	15613	15614	15615	15616	15617	15618	15619	15620	15621	15622	15623	15624	15625	15626	15627	15628	15629	15630
9	15419	15420	15421	15422	15423	15424	15425	15426	15427	15428	15429	15430	15431	15432	15433	15434	15435	15436	15437	15438	15439	15440	15441
10	15230	15231	15232	15233	15234	15235	15236	15237	15238	15239	15240	15241	15242	15243	15244	15245	15246	15247	15248	15249	15250	15251	15252
11	15040	15041	15042	15043	15044	15045	15046	15047	15048	15049	15050	15051	15052	15053	15054	15055	15056	15057	15058	15059	15060	15061	15062
12	14853	14854	14855	14856	14857	14858	14859	14860	14861	14862	14863	14864	14865	14866	14867	14868	14869	14870	14871	14872	14873	14874	14875
13	14671	14672	14673	14674	14675	14676	14677	14678	14679	14680	14681	14682	14683	14684	14685	14686	14687	14688	14689	14690	14691	14692	14693
14	14489	14490	14491	14492	14493	14494	14495	14496	14497	14498	14499	14500	14501	14502	14503	14504	14505	14506	14507	14508	14509	14510	14511
15	14309	14310	14311	14312	14313	14314	14315	14316	14317	14318	14319	14320	14321	14322	14323	14324	14325	14326	14327	14328	14329	14330	14331
16	14129	14130	14131	14132	14133	14134	14135	14136	14137	14138	14139	14140	14141	14142	14143	14144	14145	14146	14147	14148	14149	14150	14151
17	13949	13950	13951	13952	13953	13954	13955	13956	13957	13958	13959	13960	13961	13962	13963	13964	13965	13966	13967	13968	13969	13970	13971
18	13769	13770	13771	13772	13773	13774	13775	13776	13777	13778	13779	13780	13781	13782	13783	13784	13785	13786	13787	13788	13789	13790	13791
19	13589	13590	13591	13592	13593	13594	13595	13596	13597	13598	13599	13600	13601	13602	13603	13604	13605	13606	13607	13608	13609	13610	13611
20	13408	13409	13410	13411	13412	13413	13414	13415	13416	13417	13418	13419	13420	13421	13422	13423	13424	13425	13426	13427	13428	13429	13430
21	13227	13228	13229	13230	13231	13232	13233	13234	13235	13236	13237	13238	13239	13240	13241	13242	13243	13244	13245	13246	13247	13248	13249

Fonte: Acervo dos autores.

3.4 DESENVOLVIMENTO DOS CÓDIGOS

Nesta etapa do projeto os planejamentos anteriores como a disposição geográfica das ID's e a tabela com respectivas suas informações, foram de grande importância pois facilitou e otimizou o cálculo das funções, para a função de segundo grau partiu-se da ideia de subdividir a região em 13 sub-regiões, assim para se iniciar este código foi-se transportada as informações da tabela para o Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE) assim podendo manusear e subdividir a tabela e as sub regiões existentes na Tabela 4, fazendo a aplicação do método da estrela e aplicando nesta 13 regiões pode-se obter seus termos dependentes e independente do polinômio assim como na Tabela 8.

Tabela 8 – Termos dependentes e independentes da função de segundo grau referentes ao mês de agosto.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	6.8380	6.8270	6.8260	6.7290	6.8930	6.8000	6.8640	6.7710	6.9290	6.7340	6.2660	6.5630	6.8950
2	-0.0021	-0.0012	-0.0113	0.0375	-0.0082	0.1041	9.8313e-04	0.0206	0.0043	0.0991	0.0333	0.0157	-0.0438
3	-0.0413	0.0062	-0.1077	0.0193	0.0124	0.0132	0.0602	-0.0340	-0.0407	0.1220	0.0977	0.0581	-0.1029
4	0.0335	0.0728	-0.0252	0.0291	0.0013	0.0668	-0.0175	-0.0304	-0.0960	0.0469	0.1570	0.0492	-0.0368
5	-0.0295	0.0178	0.0253	0.0341	-0.0827	0.0983	0.0220	0.0058	-0.0498	-0.0226	0.1858	0.1610	-0.0878
6	0.0079	-0.0331	-0.0228	0.0267	0.0218	0.0499	-0.0311	-0.0392	0.0727	-0.0509	-0.0619	-0.0043	-0.0977

Fonte: Acervo dos autores.

Para as equações de grau maior que 2, devido a proposta de ser uma única superfície que represente toda a base de dados coletada, de acordo com a Tabela 5, o código anteriormente usado será adaptado para a nova proposta, ao fazer a coleta das tabelas e enviá-las a IDE, foi

construída três matrizes com os valores de irradiação, a latitude e a longitude, com essas matrizes em mãos pode-se fazer a substituição direta para construir a matriz X onde foi se construída de forma onde é permitido mudar o grau da função como consegue-se ver na Figura 7, sendo inicialmente selecionada no topo do código, com a finalidade de otimizar os testes e ver as diferenças entre o grau das funções, em seguida foi calculado os valores dos termos dependentes e independente da função, e para a inversão da matriz X se fez a utilização do método convencional, para que possa ser visualizado o comportamento da função adquirida se fez a construção de uma malha referente a base geográfica, assim adquirindo os valores para cada posição, que por fim é possível plotar a curva e fazer o cálculo do erro e do desvio padrão.

Figura 7 – Construção da matriz X.

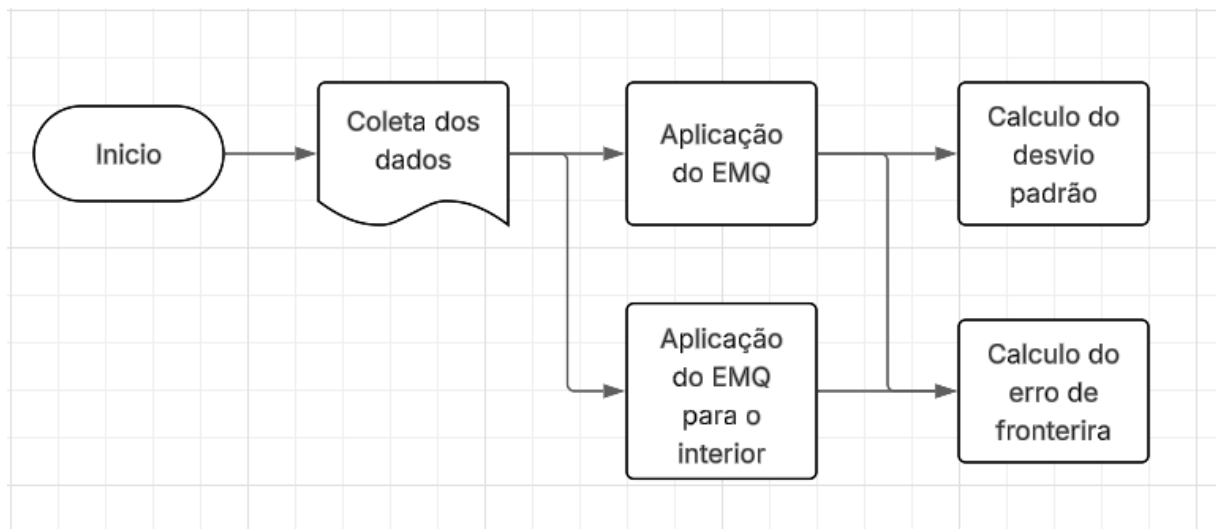
```
%Criação da matrix X de a cordo com o grau.
Y=nu(1:483,colmes);
yy=nu(1:483,2);
xx=nu(1:483,3);
X(1:a,1:10)=NaN;
for ii=1:a
    if g==3
        %3°
        X(ii,1:10)=[1 xx(ii) yy(ii) xx(ii)^2 xx(ii)*yy(ii) yy(ii)^2 xx(ii)^3 (xx(ii)^2)*yy(ii) (yy(ii)^2)*xx(ii);
    end
    if g==4
        %4°
        X(ii,1:15)=[1 xx(ii) yy(ii) xx(ii)^2 xx(ii)*yy(ii) yy(ii)^2 xx(ii)^3 (xx(ii)^2)*yy(ii) (yy(ii)^2)*xx(ii);
    end
    if g==5
```

Fonte: Acervo dos autores.

3.4.1 ERRO MINIMO QUADRADO E DESVIO PADRÃO

Para o cálculo do erro como anteriormente já explicado será usado o método do erro médio quadrático, onde ao adquirir os resultados dos polinômios pode-se ser aplicado a equação do método que se é somatório do valor absoluto da diferença entre a o valor real e a função sendo elevado ao quadrado dividido pelo número total de amostras e por fim tirado a raiz quadrada e para o desvio padrão precisasse do resultado erro médio quadrático assim tendo um somatório do valor absoluto da diferença entre o valor real e da função sendo subtraído o resultado do erro isso tudo elevado ao quadrado e por fim esse resultado sendo dividido pelo número de amostras menos 1 e a raiz desta divisão, parra os erros de fronteira e interior será utilizado a mesma base do cálculo do erro médio ou lembrando que o erro médio é o total da soma da fronteira e o interior, e serão comparados entre eles, esses quatro cálculos podem ser observados no fluxograma representado pela Figura 8.

Figura 8 – Fluxograma do Código referente ao EMQ, desvio padrão, erro de fronteira e interior.

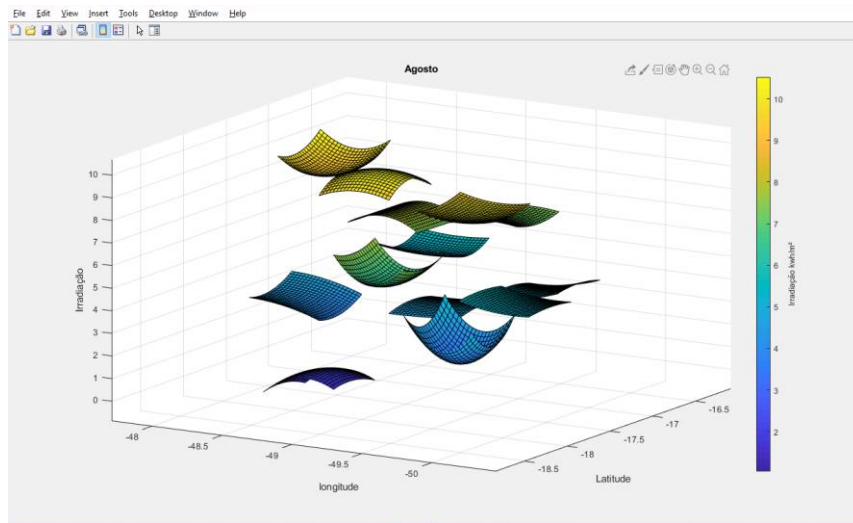


Fonte: Acervo dos autores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, aborda-se o estudo das superfícies de segundo grau, as quais apresentam diversos problemas a serem discutidos. O principal, evidenciado na Figura 9, refere-se ao fato de existirem 13 superfícies distintas que não se conectam entre si, o que gera lacunas entre os valores obtidos. Essa descontinuidade compromete a adequação do modelo como referência, tanto pela falta de continuidade quanto pela baixa representatividade em relação aos valores reais.

Figura 9 - Superfícies de segundo grau referente ao mês de agosto.



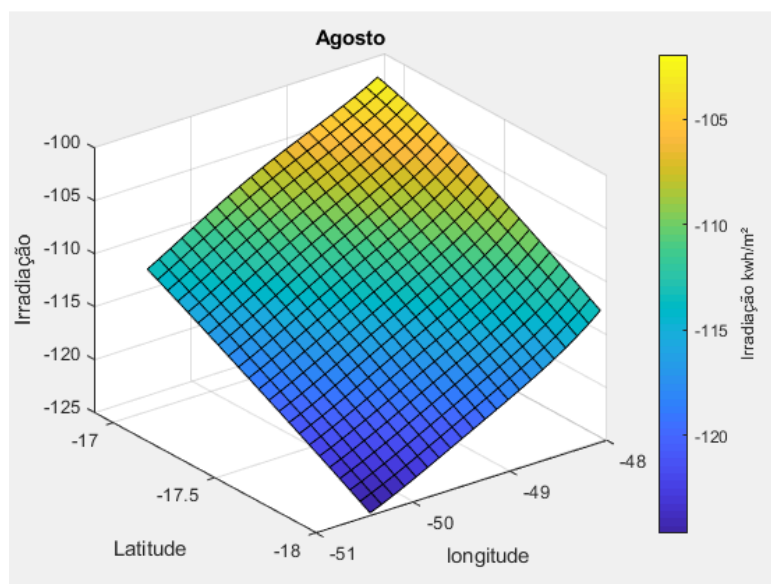
Fonte: Acervo dos autores.

Para as superfícies de grau superior a dois, destaca-se um aspecto específico do código. O método adotado para a geração dessas superfícies exige a inversão da matriz $(X^{-1}) \cdot (X)$. Essa operação, contudo, tende a produzir uma matriz próxima de uma matriz singular, caracterizada por um determinante próximo de zero e vem a apresentar uma não inversão, esta problemática vem a influenciar diretamente no resultado final fazendo com que não venha a ter uma única solução, o cálculo direto fazendo o uso do método não vem a ser possível e os resultados vem a serem instáveis (TRIOLA, 2017).

Para mitigar esse problema, foram testados outros métodos de inversão, como a decomposição em valores singulares (SVD) e a pseudo-inversa. Ao fazer uma análise entre os métodos e uma longa revisão dos cálculos observou-se que o método SVD que teria a possibilidade de ser utilizado para continuar as nossas análises não se é viável, pois devido a sensibilidade do método já citado anteriormente e veio a se observar que seu determinante se aproxima muito de zero, da mesma forma que a inversa convencional fazendo com que pequenos erros na

amostra venha a gerar valores irregulares e erros de grande escala como é possível observar na Figura 10 (TRIOLA, 2017).

Figura 10 - Erro apresentado no método SVD.

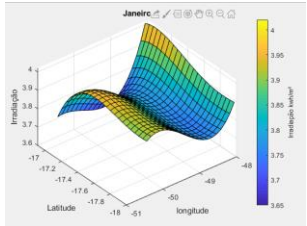
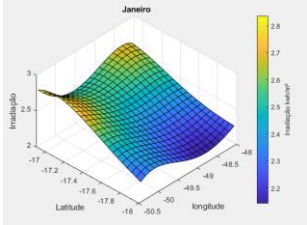
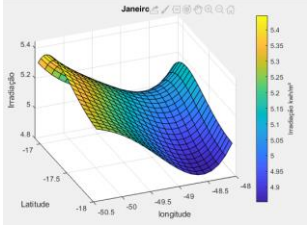


Fonte: Acervo dos autores.

Mesmo que apresente uma matriz singular o método convencional de inversão será utilizado para dar continuidade aos comparativos entre métodos pois mesmo com esta problemática os valores não vieram a apresentar uma irregularidade como visto anteriormente no método SVD, para esta próxima etapa vem a ser apresentado nas Tabelas 9, 10 e 11, os valores encontrados para todos os métodos utilizados a inversa, SVD e pseudo-inversa respectivamente e sua superfície original como apresentado na Figura 11.

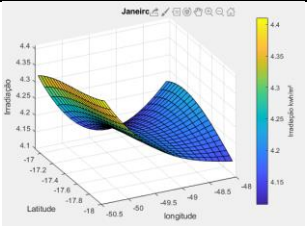
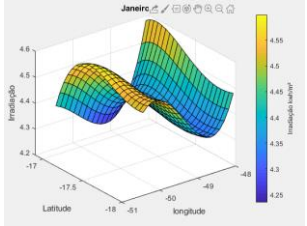
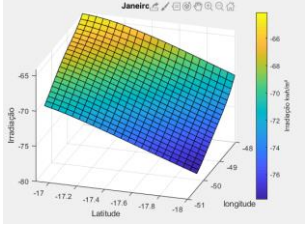
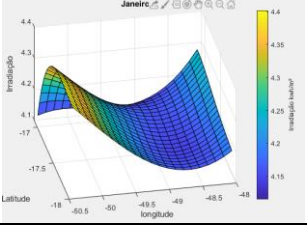
Tabela 9 – Avaliação de desempenho da inversão: Inversa.

Inversa	Superfícies	Erro	Fronteira	Interior	Desvio
Terceiro		0,2829	0,0273	0,2556	0,1738

Quarto		0,5652	0,0469	0,5183	0,2513
Quinto		1,8846	0,1676	1,7170	0,2910
Sexto		0,8075	0,0851	0,7224	0,3417

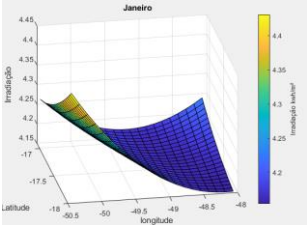
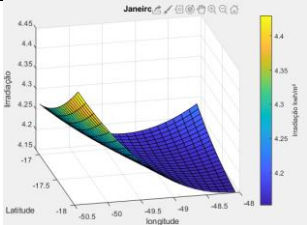
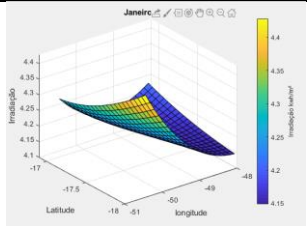
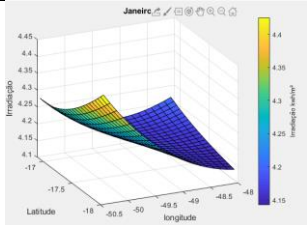
Fonte: Acervo dos autores.

Tabela 10 – Avaliação de desempenho da inversão: SVD.

SVD	Superfícies	Erro	Fronteira	Interior	Desvio
Terceiro		0,1873	0,0181	0,1691	0,1231
Quarto		0,2698	0,0313	0,2386	0,1469
Quinto		75,0366	6,8296	68,2070	3,1555
Sexto		0,1953	0,0170	0,1784	0.1267

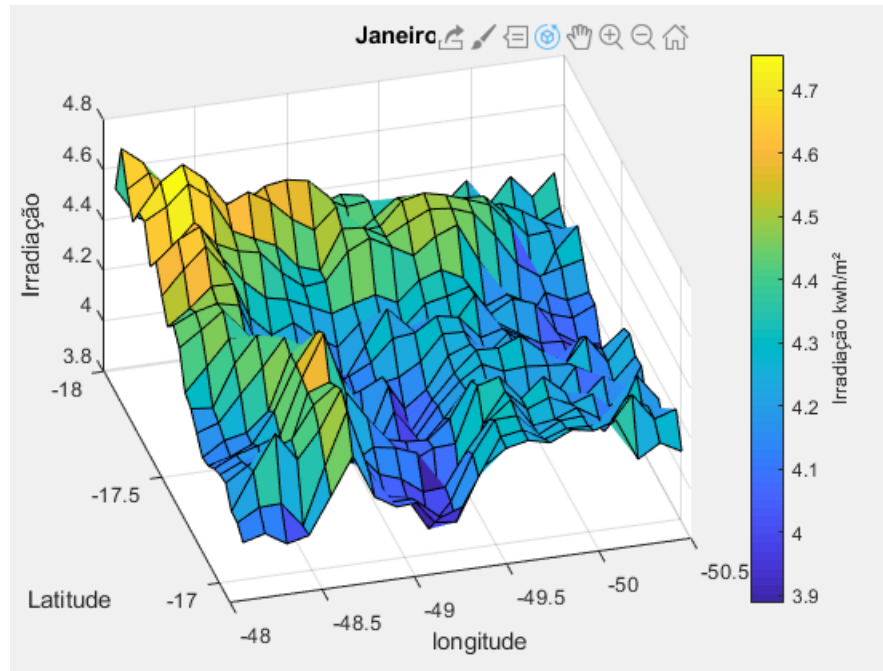
Fonte: Acervo dos autores.

Tabela 11 – Avaliação de desempenho da inversão: Pseudo-inversa.

Pseudo	Superfícies	Erro	Fronteira	Interior	Desvio
Terceiro		0,1904	0,0170	0,1734	0,1296
Quarto		0,1904	0,0169	0,1735	0,1299
Quinto		0,1903	0,0169	0,1734	0,1304
Sexto		0,1902	0,0169	0,1732	0,1310

Fonte: Acervo dos autores.

Figura 11 – Superfície dos dados iniciais do mês de janeiro.



Fonte: Acervo dos autores.

Ao adquirir esses dados das tabelas anteriores e como já previamente dito o método SVD será descontinuado neste trabalho devido ao seu erro pronunciado na função de quinto grau, nesta etapa será construído gráficos comparativos entre os dados da inversa e pseudo-inversa, com o intuito de evidenciar as diferenças entre os resultados e permitir avaliar com precisão os métodos propostos, assim serão observados nas Figuras 12, 13, 14 e 15.

Figura 12 – Gráfico comparativo do erro, entre inversa e Pseudo-inversa.



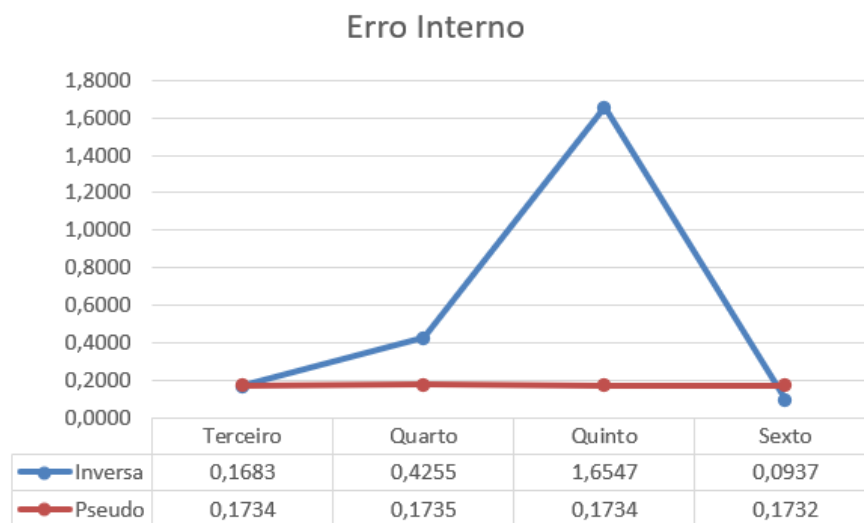
Fonte: Acervo dos autores.

Figura 13 – Gráfico comparativo do erro de fronteira, entre inversa e Pseudo-inversa.



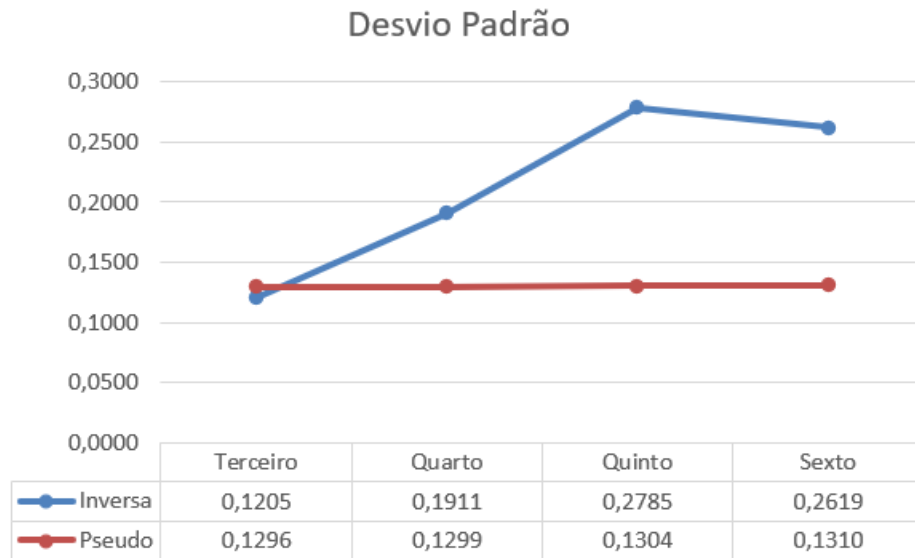
Fonte: Acervo dos autores.

Figura 14 – Gráfico comparativo do erro interno, entre inversa e Pseudo-inversa.



Fonte: Acervo dos autores.

Figura 15 – Gráfico comparativo do desvio padrão, entre inversa e Pseudo-inversa.

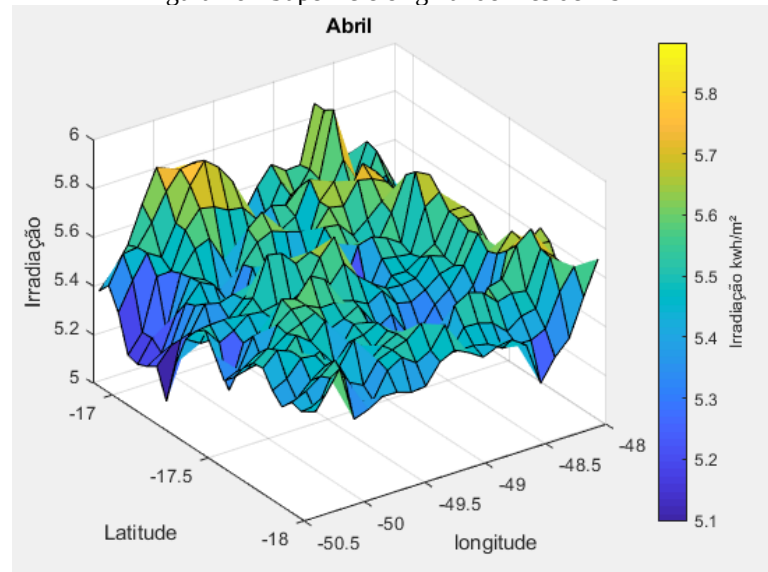


Fonte: Acervo dos autores.

Com base nas decisões anteriores e na análise realizada, compararam-se os dois métodos remanescentes que apresentaram bom desempenho. Verificou-se que, no método da pseudo-inversa, as superfícies obtidas mantêm-se praticamente idênticas, apresentando apenas pequenas variações com o aumento do grau da função. Já o método da inversa apresentou mudanças significativas entre os diferentes graus, sugerindo que o maior erro observado no quinto grau possa estar relacionado à elevada sensibilidade do método. Essa sensibilidade refere-se à influência do fator do método de inversão se aproximar de uma matriz singular, que podem afetar substancialmente o resultado final. Considerando a estabilidade evidenciada nos testes, definiu-se a adoção da pseudo-inversa como método de inversão de matriz nas etapas subsequentes.

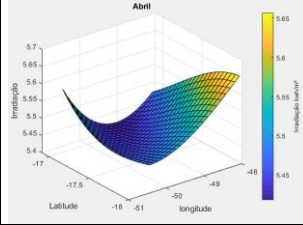
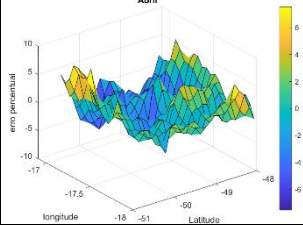
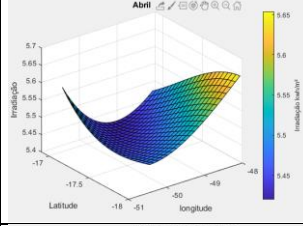
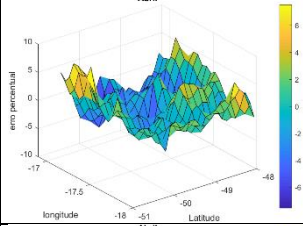
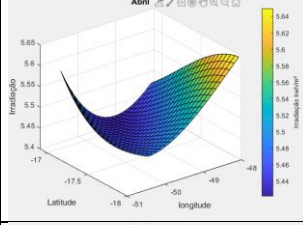
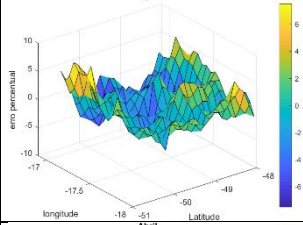
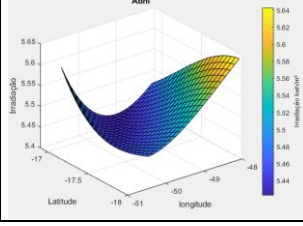
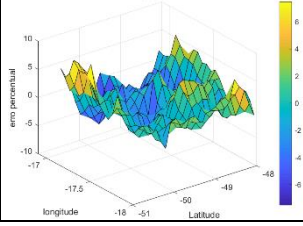
Com o método de inversão definido, deu-se continuidade à análise dos gráficos, contemplando o erro médio quadrático, o erro de fronteira, o erro interno e seus respectivos desvios-padrão. Para essa etapa, elaboraram-se tabelas destinadas à comparação dos meses de maior irradiação média abril, maio, junho, julho e agosto, juntamente com as superfícies de terceiro, quarto, quinto e sexto graus e suas respectivas superfícies relativas ao erro conforme apresentado nas Tabelas 12, 13, 14, 15 e 16 e as superfícies de origem representadas nas Figuras 16, 17, 18, 19 e 20.

Figura 16 - Superfície original do mês de Abril



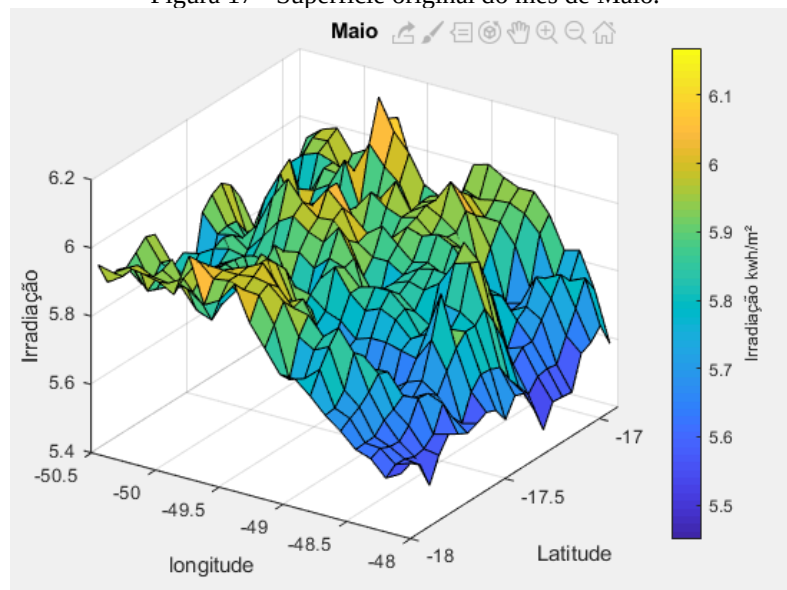
Fonte: Acervo dos autores.

Tabela 12 – Resultados do mês de Abril.

Abril	Superfícies	Erro	Superfície do erro	Fron- teira	Interior	Desvio
Ter- ceiro		0,1397		0,0077	0,1320	0,0931
Quarto		0,1394		0,0076	0,1318	0,0928
Quinto		0,1391		0,0075	0,1316	0,0926
Sexto		0,1387		0,0072	0,1315	0,0922

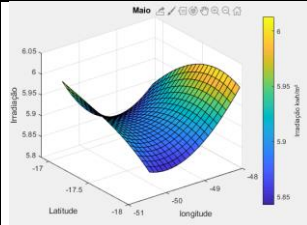
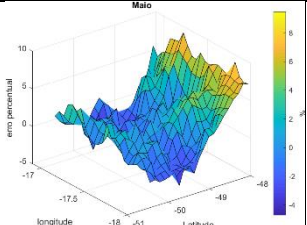
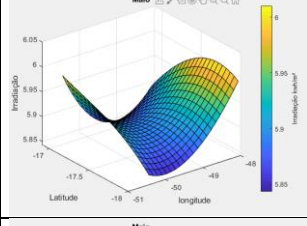
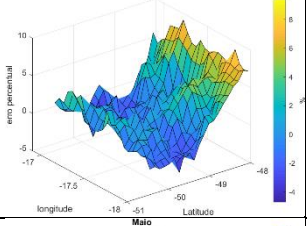
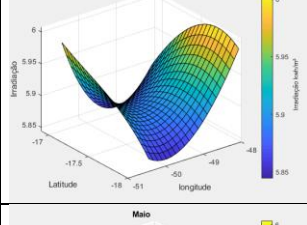
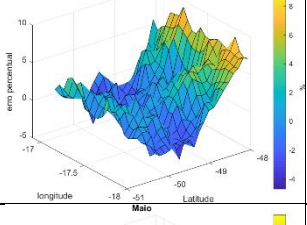
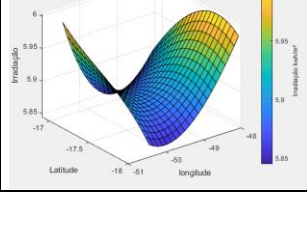
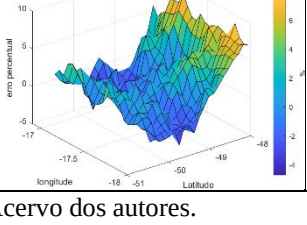
Fonte: Acervo dos autores.

Figura 17 - Superfície original do mês de Maio.



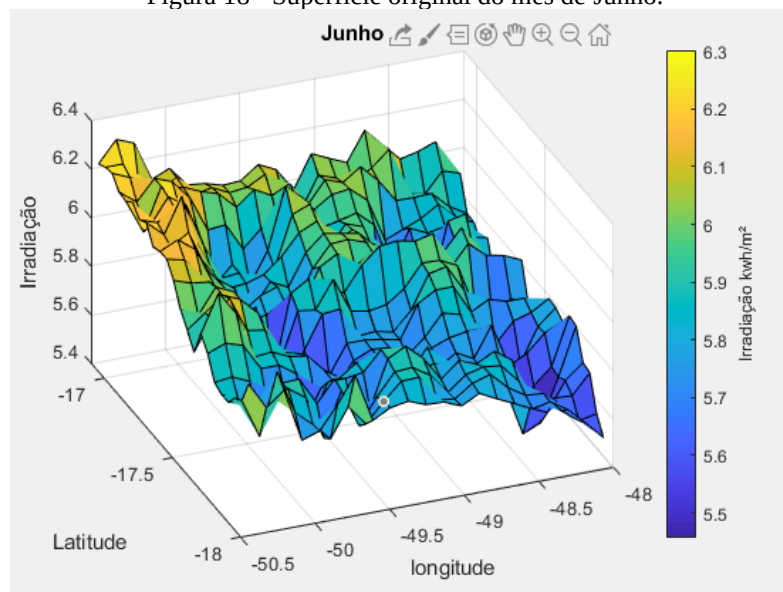
Fonte: Acervo dos autores.

Tabela 13 – Resultados do mês de Maio.

Maio	Superfícies	Erro	Superfície do erro	Fron- teira	Interior	Desvio
Ter- ceiro		0,1678		0,0210	0,1468	0,1237
Quarto		0,1673		0,0209	0,1465	0,1232
Quinto		0,1668		0,0207	0,1461	0,1227
Sexto		0,1661		0,0205	0,1456	0,1220

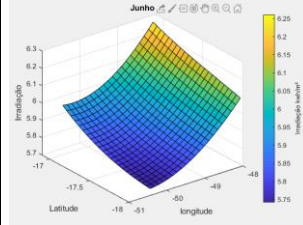
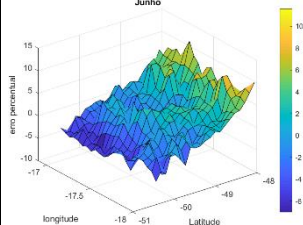
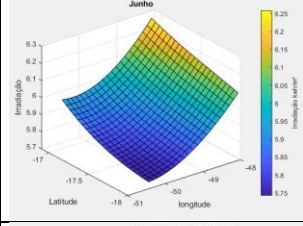
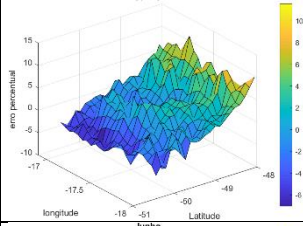
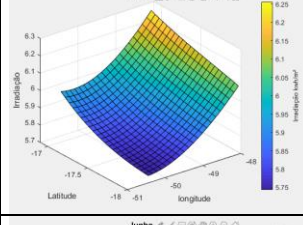
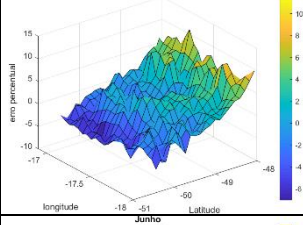
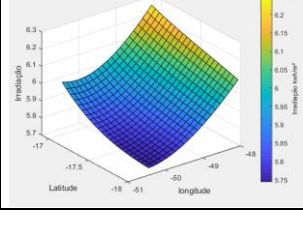
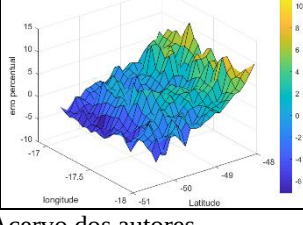
Fonte: Acervo dos autores.

Figura 18 - Superfície original do mês de Junho.



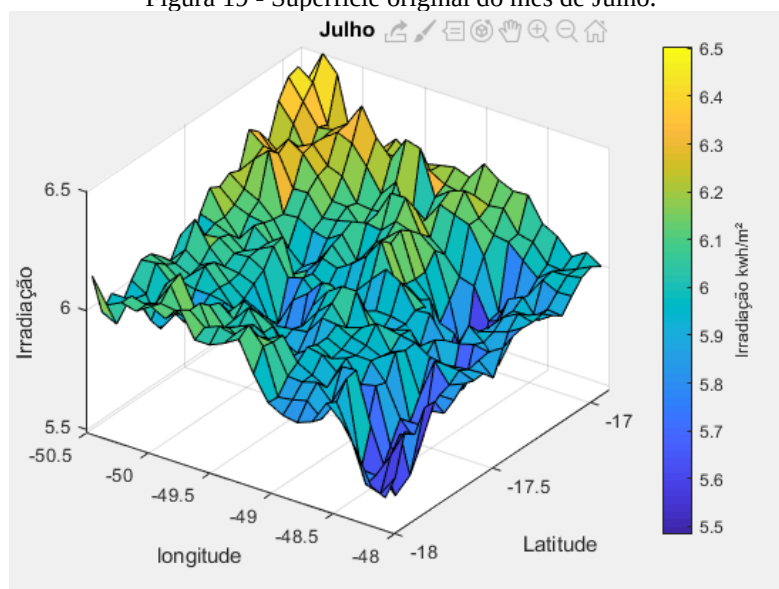
Fonte: Acervo dos autores.

Tabela 14 – Resultados do mês de Junho.

Junho	Superfícies	Erro	Superfície do erro	Fron- teira	Interior	Desvio
Ter- ceiro		0,2189		0,0172	0,2016	0,1417
Quarto		0,2187		0,0171	0,2017	0,1415
Quinto		0,2186		0,0168	0,2018	0,1413
Sexto		0,2184		0,0163	0,2021	0,1408

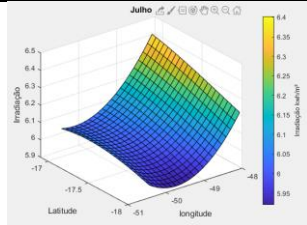
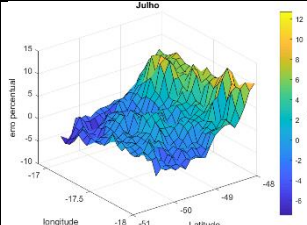
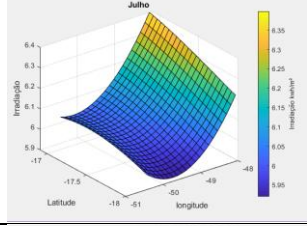
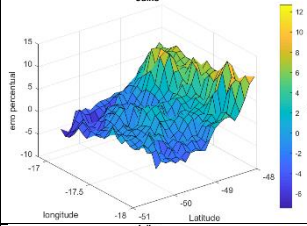
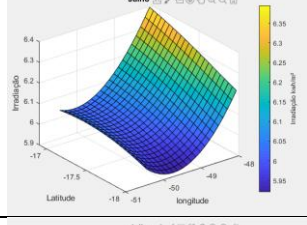
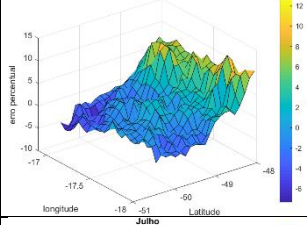
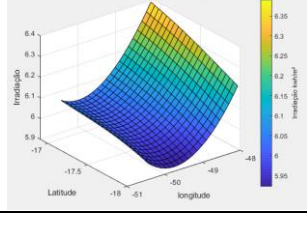
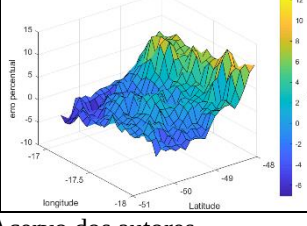
Fonte: Acervo dos autores.

Figura 19 - Superfície original do mês de Julho.



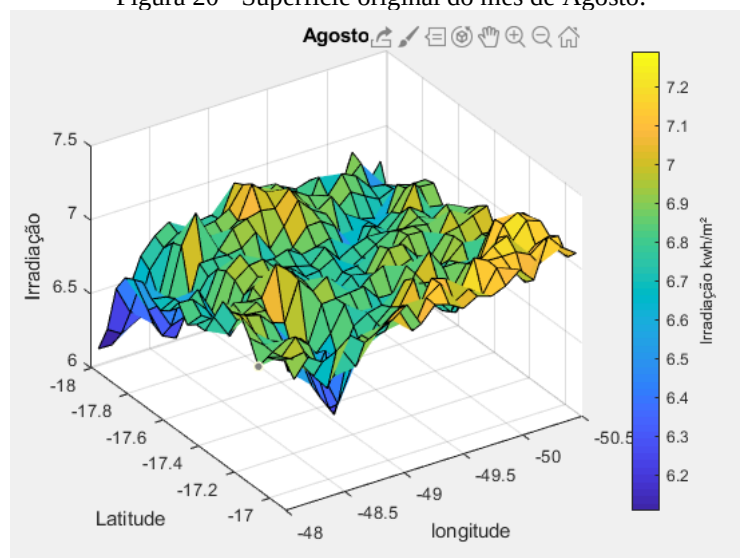
Fonte: Acervo dos autores.

Tabela 15 – Resultados do mês de Julho.

Julho	Superfícies	Erro	Superfície do erro	Fron- teira	Interior	Desvio
Ter- ceiro		0,2443		0,0106	0,2337	0,1685
Quarto		0,2437		0,0103	0,2333	0,1679
Quinto		0,2430		0,0100	0,2331	0,1671
Sexto		0,2422		0,0093	0,2329	0,1660

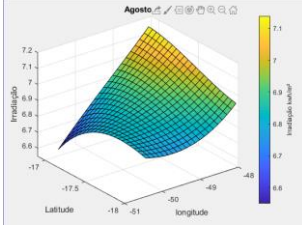
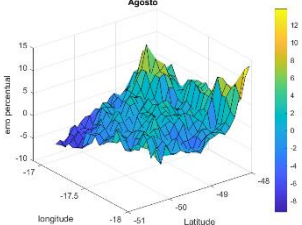
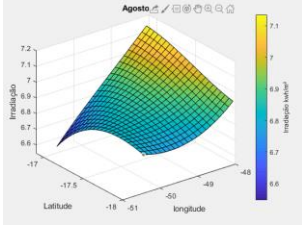
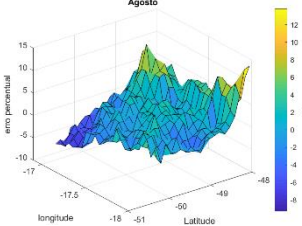
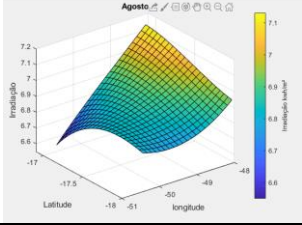
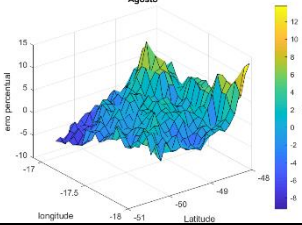
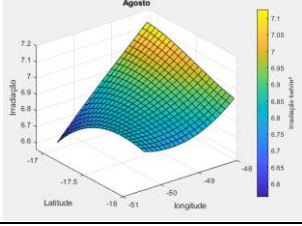
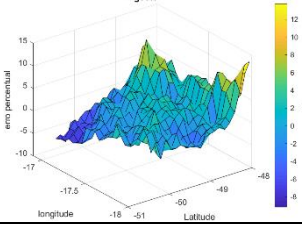
Fonte: Acervo dos autores.

Figura 20 - Superfície original do mês de Agosto.



Fonte: Acervo dos autores.

Tabela 16 – Resultados do mês de Agosto.

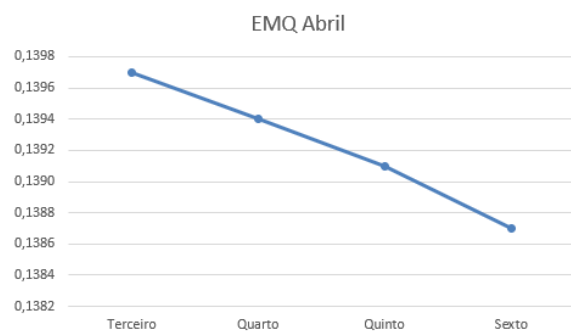
Agosto	Superfícies	Erro	Superfície do erro	Fronteira	Interior	Desvio
Terceiro		0,2381		0,0128	0,2253	0,1672
Quarto		0,2379		0,0128	0,2251	0,1672
Quinto		0,2376		0,0126	0,2250	0,1669
Sexto		0,2369		0,0122	0,2247	0,1662

Fonte: Acervo dos autores.

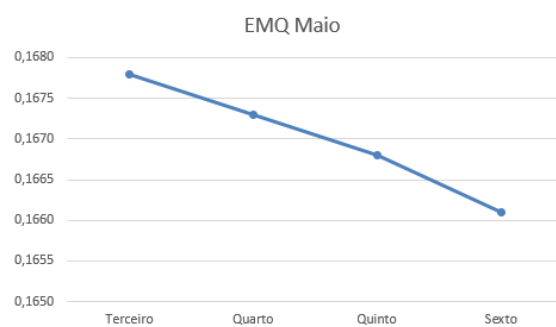
Com base nos resultados apresentados anteriormente, verifica-se que o método adotado para a inversão das matrizes demonstrou elevada eficácia, preservando a estabilidade das superfícies e facilitando a análise dos dados. A comparação dos resultados e a avaliação das superfícies associadas ao erro indicam que, para todos os meses considerados, a região de fronteira apresentou valores de erro superiores aos observados no interior.

Para fins comparativos, foram elaborados gráficos individuais para cada grau da função, contemplando os resultados obtidos para o erro médio quadrático (EMQ), o erro de fronteira, o erro interno e o desvio padrão. De modo geral, os resultados evidenciam um declínio ao longo da progressão do grau da função, apresentando majoritariamente diferenças situadas na terceira e na quarta casas decimais. Em todos os casos analisados, o polinômio de sexto grau apresentou os menores valores, que pode ser detalhadamente observado nas Figuras 21 a 24.

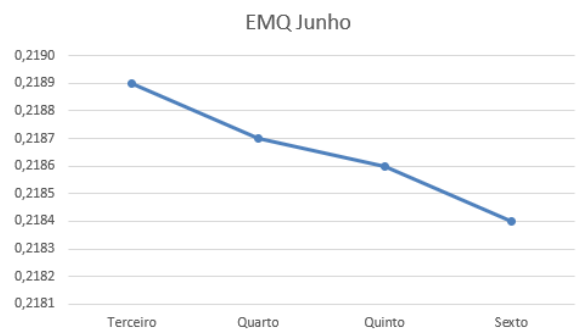
Figura 21 - EMQ dos meses de Abril a Agosto.



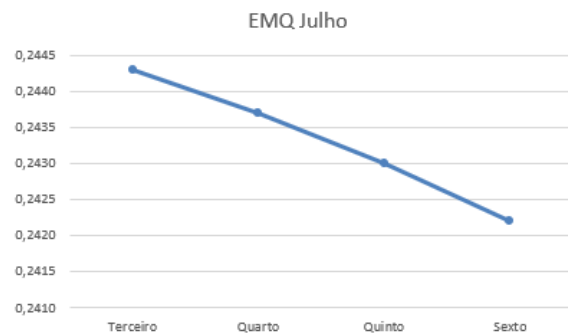
a) Gráfico EMQ do mês de Abril.



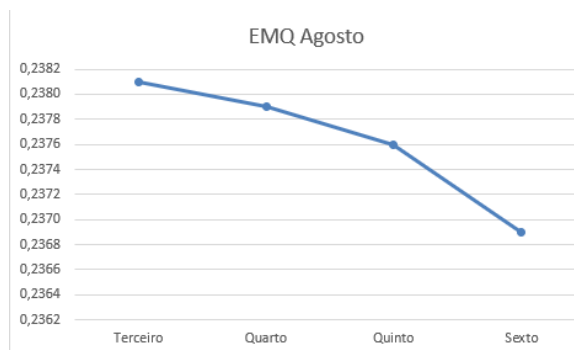
b) Gráfico EMQ do mês de Maio.



c) Gráfico EMQ do mês de Junho.



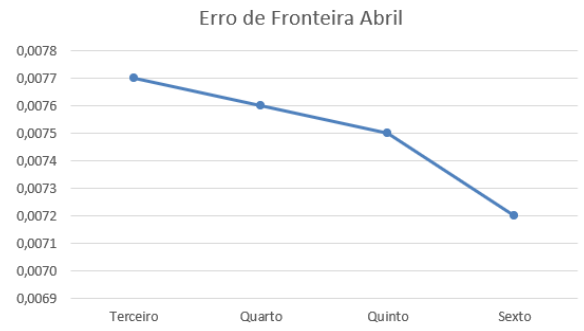
d) Gráfico EMQ do mês de Julho.



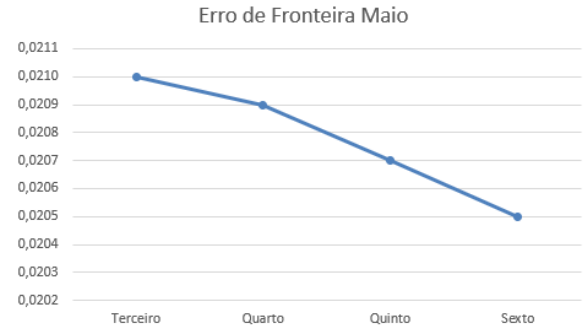
e) Gráfico EMQ do mês de Agosto.

Fonte: Acervo dos autores.

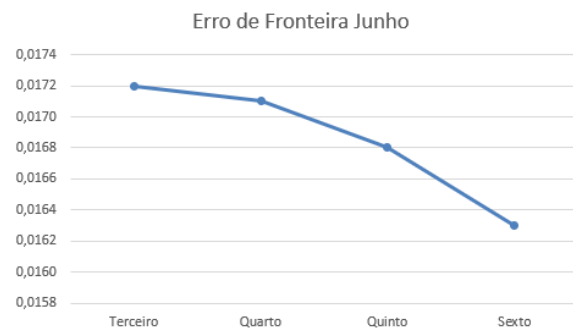
Figura 22 - Erro de fronteira de Abril a Agosto.



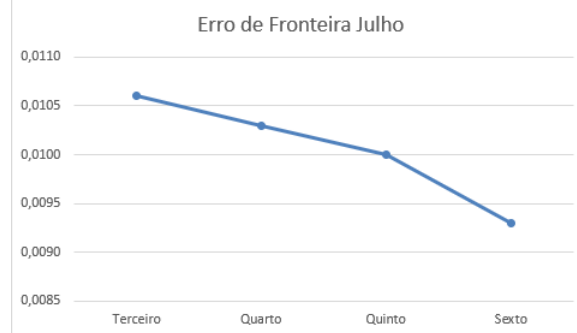
a) Erro de fronteira do mês de Abril.



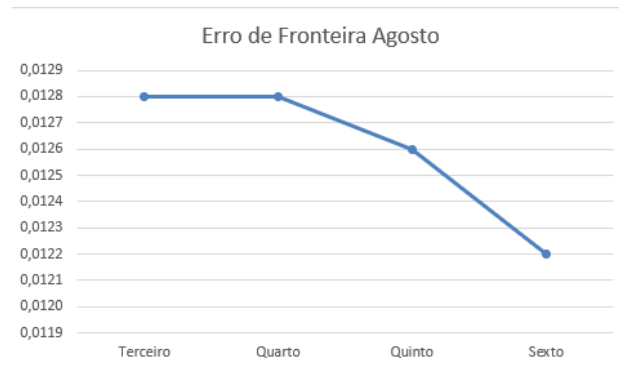
b) Erro de fronteira do mês de Maio.



c) Erro de fronteira do mês de Junho.



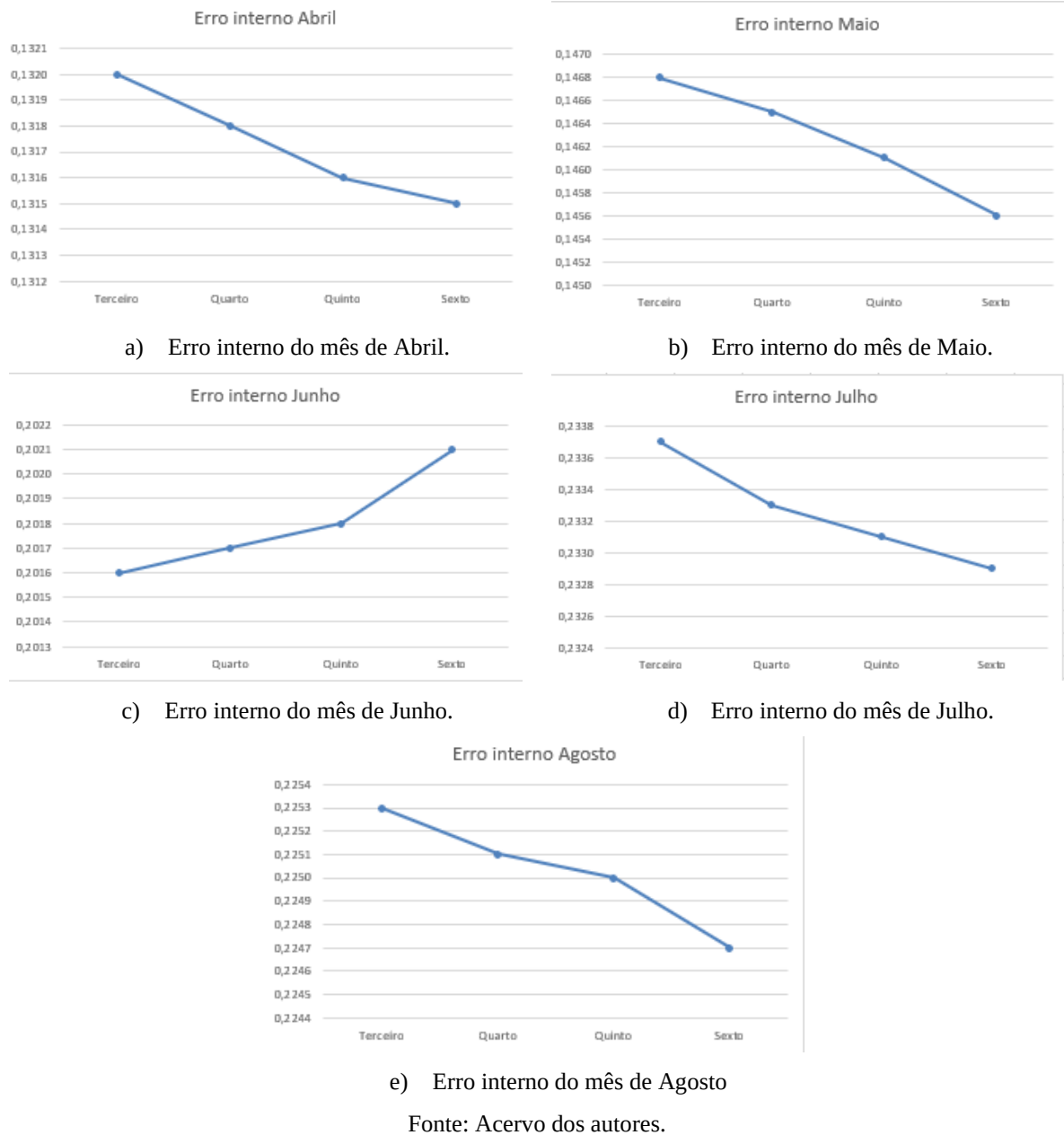
d) Erro de fronteira do mês de Julho.



e) Erro de fronteira do mês de Agosto.

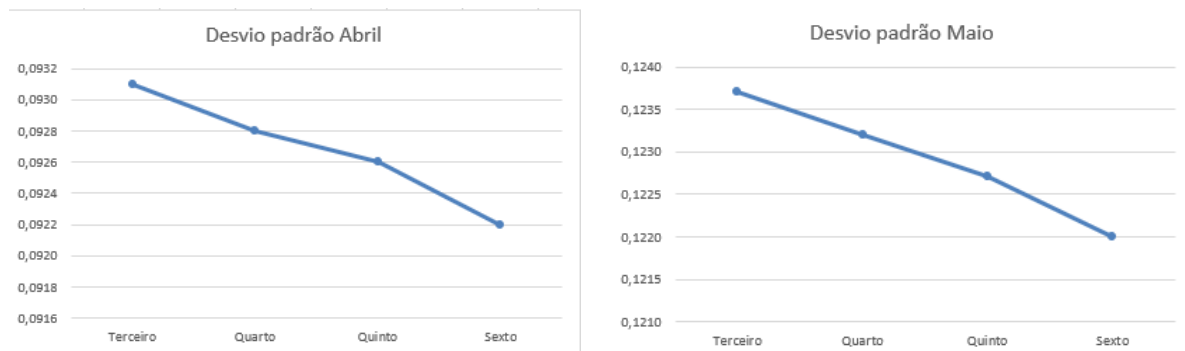
Fonte: Acervo dos autores.

Figura 23 - Erro interno de Abril a Agosto.



Fonte: Acervo dos autores.

Figura 24 - Desvio padrão de Abril a Agosto.



a) Desvio padrão do mês de Abril.



b) Desvio padrão do mês Julho.



c) Desvio padrão do mês Junho.



d) Desvio padrão do mês Julho.

e) Desvio padrão do mês Agosto

Fonte: Acervo dos autores.

Conforme mencionado anteriormente, as curvas apresentam inclinação descendente, evidenciando a melhoria do erro conforme a elevação do grau do polinômio de ajuste. Entretanto, observa-se que, no mês de junho, o erro interno apresentou tendência de crescimento à medida que o grau da função aumentou, enquanto o erro de fronteira manteve-se em declínio. Ainda assim, assim como nas demais curvas, o erro médio quadrático (EMQ) apresentou redução contínua, de modo que, no resultado geral, o comportamento manteve-se semelhante ao das outras funções, preservando a constatação de que o polinômio de sexto grau permanece o mais representativo e, portanto, a melhor opção entre as avaliadas.

5 CONCLUSÃO

Este projeto foi criado com o intuito de facilitar e simplificar a utilização de dados de irradiação solar, já que, em seu formato original, exigem o uso de aplicativos de edição de planilhas eletrônicas e, além disso, são apresentados em codificação de ID que exigem um pré-tratamento para sua manipulação. O objetivo estabelecido foi o de desenvolver um modelo matemático para a microrregião de Meia Ponte com o menor erro possível, que fosse fácil de usar e aplicar em outros projetos, eliminando a necessidade de utilizar a base de dados disponível no mapa solarimétrico oficial do INPE.

Ao analisar os resultados, é possível inferir várias conclusões sobre o método e as superfícies de resposta geradas. Inicialmente, durante o desenvolvimento do projeto, foi observado que a superfície de sexto grau apresentou o menor erro e melhor correspondência com os resultados esperados. No entanto, essa superfície consiste de 28 termos dependentes e independentes, o que pressupõe aumento da carga de trabalho necessária para se obter o resultado desejado. Em contrapartida, a superfície de terceiro grau exige menos esforço computacional, com apenas 10 termos, apresentando interessante relação de compromisso, já que a diferença no erro quadrático médio, por exemplo, é de apenas 0,0012 no mês de agosto.

Assim exposto, a conclusão do método aplicado e das superfícies geradas é que o resultado esperado dependerá da necessidade de precisão do usuário conjugada a capacidade computacional disponível. Se o usuário precisar de um grau de superfície maior devido à complexidade dos dados, à precisão do erro ou à dificuldade de execução do método, uma análise inicial dos dados base deve ser realizada para determinar a melhor opção. Para o caso em estudo, a superfície de terceiro grau pode ser utilizada com facilidade, pois atende bem às necessidades propostas, sendo fácil de aplicar e apresentando um baixo erro.

6 TRABALHOS FUTUROS

Com base neste projeto, foi possível identificar oportunidades para aprimoramento e expansão. Uma das principais é a análise de novos métodos de inversão de matrizes, para que seus efeitos sobre as funções possam ser estudados. O objetivo seria padronizar o método ideal para uso no Método dos Mínimos Quadrados (MMQ).

Outro ponto a ser explorado é a questão levantada em relação às funções de segundo grau: a necessidade de um método para coincidir as superfícies. Seria importante analisar se essa abordagem seria mais eficaz e quais seriam seus efeitos nos resultados, em comparação com o método já apresentado.

Além disso, a decisão sobre qual modelo matemático a ser adotado pode ser balizada através de testes de esforço computacional nas plataformas de interesse, como por exemplo aplicativos para dispositivos móveis ou computadores portáteis. Esse aspecto já foi incluído para avaliação como parte dos trabalhos de iniciação científica aprovada no ciclo 2024/2025.

Por fim, uma possibilidade que pode abrir novas portas para projetos futuros é a utilização de inteligência artificial (IA). O uso de redes neurais ou algoritmos genéticos poderia oferecer uma solução de superfície com um erro ainda menor e de aplicação mais fácil do que o método atual.

REFERÊNCIAS

- ABREU, S. L. DE. Qualificação e recuperação de dados de radiação solar medidos em Florianópolis - SC. 2000. 37 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.
- ALVES, L. B.; Energias Renováveis: análise da geração fotovoltaica no Brasil e Goiás. Instituto Mauro Borges de Estatística e Estudos Socioeconômicos – IMB do SEG-PLAN, Secretaria de Estado de Gestão e Planejamento (Estado de Goiás). Dez/2018.
- CEBALLOS, J. C.; BOTTINO, M. J.; de SOUZA J. M. A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery. J. Geophys. Res., v. 109, D02211, doi:10.1029/2003JD003531, 2004.
- FIORIN, D. V., MARTINS, F. R., SCHUCH, N. J., PEREIRA, E. B. Aplicações de redes neurais e previsões de disponibilidade de recursos energéticos solares. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 33, n. 1, 1309 (2011)
- GUARNIERI, R. A.; Emprego de redes neurais artificiais e regressão linear múltipla no refinamento das previsões de radiação solar do modelo eta. 171f. Dissertação (Mestrado), Curso de Pós-Graduação em Meteorologia - INPE-14172-TDI/1089, São José dos Campos, 2006.
- HAYKIN, S. (2007). Redes Neurais: Princípios e Prática. Brasil: Artmed.
- INPE, LACTEC. Métodos de menor custo para prospecção e avaliação do potencial solar brasileiro. Projeto P&D Petrobrás, PD-0553-0041/2016. Finalização em 30/03/2020.
- LIMA, F. J. L. Previsão de irradiação solar no nordeste do brasil empregando o modelo WRF ajustado por redes neurais artificiais (RNAs). 628f. Tese (Doutorado). sid.inpe.br/mtc-m18/2015/05.21.19.32-TDI, INPE, São José dos Campos, 2015.
- LIU, K. N. An introduction to atmospheric radiation. New York: Academic Press Inc., 1980. 392p.
- MARTINS, F. R., PEREIRA, E. B., Estudo comparativo da confiabilidade de estimativas de irradiação solar para o sudeste brasileiro obtidas a partir de dados de satélite e por interpolação/extrapolação de dados de superfície. Revista Brasileira de Geofísica (2011) 29(2): 265-276, ISSN 0102-261X
- MENDES, I. A., REZENDE, R. A. D., NASCIMENTO, T. H. F., SILVA, J. S. F., SILVA, O. F.; A utilização das redes neurais artificiais na previsão de radiação solar global. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2017, 8 a 11 de agosto de 2017 – Belém-PA, Brasil.
- MEYER, R., SAUAIA, R., KOLOSZUK, R.; A força da energia solar em tempos de pandemia. ABSOLAR. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/noticia/artigos-da-absolar/a-forca-da-energia-solar-em-tempos-de-pandemia.html>>. Acesso em 08 de outubro de 2020.
- OLIVEIRA, J. S.; Desenvolvimento e treinamento de redes neurais artificiais para o processamento de dados de radiação solar. 37 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.
- PEDROSA FILHO, M. H. O., GERÔNIMO, C. A. O; Desenvolvimento de modelos de correlação e ajuste da radiação difusa para o agreste pernambucano. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado, 17 a 20 de abril de 2018.
- PORTAL SOLAR, Nos primeiros dois meses de 2021, fonte solar fotovoltaica totaliza 270 MW de potência instalada no Brasil. 2021. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/geracao-solar/nos-primeiros-dois-meses-de-2021-fonte-solar-fotovoltaica-totaliza-270-mw-de-potencia-instalada-no-brasil.html>>. Acesso em: 22 de maio de 2021.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G.. Atlas brasileiro de energia solar - 2017. 2.ed. São José dos Campos : INPE, 2017. 88p.: il. (E-BOOK). ISBN 978-85-17-00089-8.

SILVA, I. N., SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A.; Redes neurais artificiais: para engenharia e ciências aplicadas. 2a. Ed. São Paulo: Artliber, 2019.

VILELA, O. C., PEDROSA FILHO, M. H. O., ESCOBEDO, J. F., PAI, A. D., RAI-CHIJK, C., SALAZAR, G. A., GROSSI, H., RIGHINI, R. e FRAIDENRAICH, N., 2015. Qualificação e caracterização da radiação direta, difusa e global em diferentes localidades do Brasil e Argentina. XXXVIII Reunión de trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente, San Rafael - ARG.

NETO, J. A. F., SILVA, T. G., MENDES, D., 2022. Avaliação das componentes da radiação solar e do índice de claridade para Caiacó/RN. IX Congresso Brasileiro de Energia Solar.

VIEIRA, H. B. G., GENRO, R. H., 2013. Estimativa da acurácia posicional de documentos cartográficos na Petrobras a partir do erro máximo provável inferido do erro médio quadrático e da respectiva variância propagada, Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto.

UFRGS. Álgebra Linear., 2024. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/reamat/AlgebraLinear/livro/c.html>. Acesso em: 14 ago. 2025.

SODRÉ, Ulysses. Matemática Essencial: Álgebra Linear: Método dos Mínimos Quadrados. Londrina: UEL, 2010. Disponível em: <https://www.uel.br/projetos/matessencial/superior/alinear/mmq.html#menu-closed>. Acesso em: 14 ago. 2025.

SILVA, V. M., MATTOS V. L. D., 2017. O método dos mínimos quadrados no ajuste de um modelo polinomial. Scientia Plena vol.13, num 04.

SILVA JUNIOR, J. R. S., 2023. Ajuste de Dados usando Mínimos Quadrados Lineares. TCC (Graduação) – Curso de Licenciatura em Matemática. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Caiacó, 2023.

FERNANDES, R. J. Estudo sobre o Método dos Mínimos Quadrados: Aspectos Teóricos e Aplicações na Física. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Matemática a Distância) - Faculdade de Matemática, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.

ORIGO ENERGIA. Energia solar no Brasil: produção, crescimento e mercado em 2025. 28 jan. 2025. Disponível em: <https://origoenergia.com.br/blog/energia/energia-solar-no-brasi>. Acesso em: 14 ago. 2025.