



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ESTUDO E ELABORAÇÃO DE ANO METEOROLÓGICO TÍPICO
PARA REGIÕES METROPOLITANAS BASEADO EM SÉRIES
TEMPORAIS DE IRRADIÂNCIA SOLAR OBTIDAS A PARTIR DE
DADOS SATELITAIS**

Pedro H. M. Firmiano

Relatório de Iniciação Científica do
Programa PIBIC, orientado pelo Dr. Rodrigo
Santos Costa e Dr. Fernando Ramos
Martins.

INPE
São José dos Campos
2021



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ESTUDO E ELABORAÇÃO DE ANO METEOROLÓGICO TÍPICO
PARA REGIÕES METROPOLITANAS BASEADO EM SÉRIES
TEMPORAIS DE IRRADIÂNCIA SOLAR OBTIDAS A PARTIR DE
DADOS SATELITAIS**

Pedro H. M. Firmiano

Relatório de Iniciação Científica do
Programa PIBIC, orientado pelo Dr. Rodrigo
Santos Costa e Dr. Fernando Ramos
Martins.

INPE
São José dos Campos
2021

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a geração de Anos Meteorológicos Típicos para municípios brasileiros. O Ano Meteorológico Típico – AMT, ou ainda TMY, do inglês *Typical Meteorological Year* – é uma base de dados bastante aplicada no setor de energia solar, principalmente no dimensionamento de plantas de geração fotovoltaica. Apenas algumas localidades no Brasil já possuem os dados processados, portanto o desenvolvimento de um pacote computacional que processe e disponibilize os dados de TMY para qualquer região do Brasil gera uma contribuição importante para o setor energético do país fornecendo assim informações relevantes e que agregam ainda mais ao mercado solar no país. A metodologia para determinação do TMY está consolidada na literatura científica e consiste na aplicação de métodos estatísticos para análise de dados meteorológicos a fim de identificar aqueles meses que melhor representam as condições meteorológicas típicas tomando como base a climatologia de um período de 30 anos. Neste projeto, utilizamos a metodologia desenvolvida pelo Laboratório Sandia (USA) que adota a comparação das distribuições de probabilidade cumulativa para as variáveis meteorológicas (temperatura, umidade relativa, velocidade de vento e radiação solar) observadas nas estações meteorológicas. O projeto teve como resultados a determinação de ano meteorológico típico com base em dados observados em estações meteorológicas automáticas operadas pelo INMET para o período de 2000 a 2018.

INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO

O conhecimento das características climatológicas de uma região é de suma importância para o desenvolvimento de projetos para exploração de fontes de energia renovável. Como as variáveis meteorológicas apresentam grandes variações no decorrer dos anos, se faz necessário à geração de um Ano Meteorológico Típico – AMT, ou ainda TMY, do inglês *Typical Meteorological Year* – para representar um longo período de dados. O Ano Meteorológico Típico permite aplicar o conhecimento da climatologia local nos procedimentos para avaliação, projeto, planejamento e operação de plantas de geração a partir de fontes renováveis. Devido a crescente emissão dos Gases de Efeito Estufa (GEE) no mundo, tem sido estudadas alternativas de obtenção de energia de modo que não emita ou emita menos GEE, como por exemplo a energia solar que começa a ganhar destaque no mercado. Segundo Pereira et al. (2017), para que essas energias cheguem de maneira mais consistente para a população, é necessário o uso de informações mais confiáveis sobre dados solares que são utilizados em projetos de implantação fotovoltaica. O TMY (*Typical Meteorological Year*) é aplicado em apenas algumas localidades no Brasil, que já possuem os dados processados, portanto é importante a obtenção, um software que interprete os dados já observados e os transforme em um TMY para qualquer região do Brasil, fornecendo assim informações relevantes e que agregaram ainda mais ao mercado solar no país.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O TMY é um procedimento bastante adotado no mundo todo e utilizado por diversos países, que “consiste na determinação estatística dos meses individuais de dados meteorológicos que melhor representam as condições meteorológicas tomando como base a climatologia de um período de 30 anos” (Luiz et al., 2012). No exemplo abaixo, segue uma ilustração que exemplifica a determinação de um TMY baseado em 17 anos de dados de irradiação.

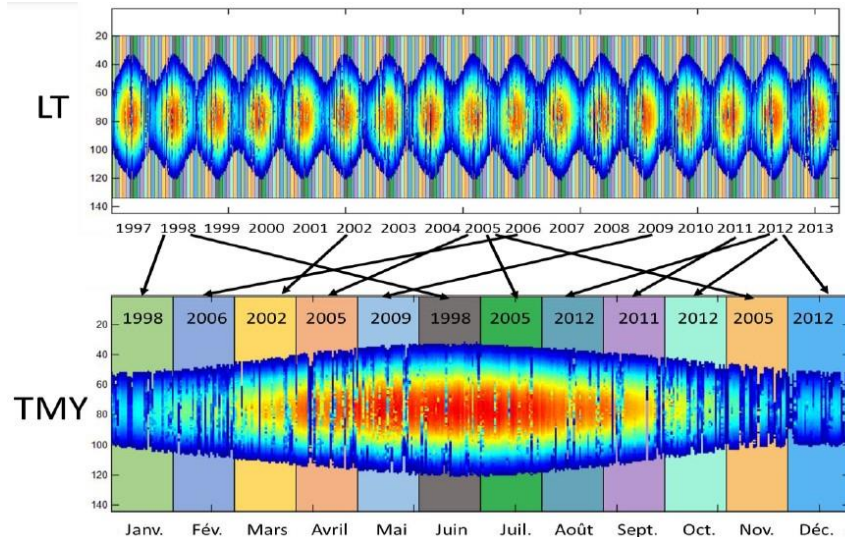


Figura 1- LT (Long-term 17 anos) construindo um ano meteorológico tipo. (fonte: Realpe et al., 2015)

Com esse conjunto de dados determinam-se os dados em questão de um ano que possa representar as condições mais frequentemente observadas ao longo de um ano para uma região específica. No Brasil, existe o TMY para algumas localidades, principalmente as capitais, entretanto a maior parte do território brasileiro não possui dados sobre outras localidades, e isso pode comprometer e aumentar o contraste entre o rendimento esperado e o real.

Ao analisar as metodologias existentes na literatura científica, vemos algumas que são de uso mais restrito de algumas localidades ou apresentam um grau de complexidade maior, necessitando de uma série histórica longa de dados observados em superfície (Skeiker, 2007). Atualmente, o método mais utilizado é o *Sandia National Laboratories* e será o utilizado no presente trabalho. O método Sandia envolve a escolha de um mês característico da climatologia local, para cada um dos 12 meses do ano entre os anos de dados coletados. Isso é feito utilizando lógica de programação aplicando a Função de Distribuição Acumulada (FDA) de quatro variáveis meteorológicas para o mês de cada ano. Essas variáveis são de temperatura de bulbo seco, temperatura de ponto de orvalho, radiação global total diária e a velocidade do vento (Luiz et al., 2012).

METODOLOGIA E ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

Curso de programação em Python

Para o desenvolvimento das atividades previstas no plano de trabalho do projeto de Iniciação Científica foi necessário a capacitação no uso de linguagem Python para a programação de scripts computacionais para execução dos procedimentos numéricos da metodologia de cálculo do ano meteorológico típico.

A linguagem Python é uma das mais empregadas em todo o mundo e vem sendo difundida em diversos cursos de computação e engenharia. Para analisar os dados é necessário conhecimento e prática com essa ferramenta, e isso pode ser obtido em cursos a distância oferecidos em plataformas como COURSERA:

<https://www.coursera.org/learn/ciencia-computacao-python-conceitos>.

O curso aborda as seguintes temáticas:

- Introdução ao Python
- Condicionais - if...else
- Repetição - while
- Funções
- Depuração e refatoração
- Repetições Encaixadas
- Listas
- Mais sobre listas
- Matrizes
- Strings, 4 Pequenos Conceitos e Modularização
- Programação Orientada a Objetos
- Algoritmos de Busca e Ordenação. Complexidade Computacional
- Algoritmos de Busca e Ordenação. Análise de Desempenho
- Recursão
- Módulo Extra - Usos Avançado

Outros materiais e tutoriais em vídeo foram importantes para a aplicação de metodologias como machine learning e manipulação e análise de dados. Os cursos foram realizados em paralelo com as atividades curriculares do Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia do Mar. O tempo dedicado ao curso foi de 15h/semanais e foram necessários 11 meses para a conclusão. Com a capacitação alcançada com o curso, procurou-se aplicar

a metodologia de TMY para uma localidade específica. Posteriormente, foi utilizado o mesmo programa repetindo o mesmo método para regiões onde a série histórica alcança no mínimo 15 anos completos de extensão.

Cálculo do TMY

Para avaliar a tipicidade dos dados climatológicos, foi utilizado o método Sandia, desenvolvido em 1978, que envolve a escolha de um mês característico da climatologia local, para cada um dos 12 meses do ano, entre 30 anos de dados coletados de forma consecutiva. Isto é feito comparando a Função de Distribuição Acumulada (CDF) de cinco variáveis meteorológicas para certo mês de cada ano com a CDF do mesmo mês em todo o período de coleta dos dados. Selecionando os cinco anos que tiveram os menores resultados e então se aplica métodos de persistência. As variáveis meteorológicas utilizadas são a temperatura de bulbo seco, a temperatura de ponto de orvalho, a radiação global total diária e a velocidade do vento. Então pode ser dividida em cinco passos:

- Primeiro passo:

Tem como base a diferença absoluta entre duas CDF's do mês analisado e o mesmo mês de todos os anos seguindo a Eq.1.

$$FS_x(y, m) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N CDF_m(x_i) - CDF_{y,m}(x_i) \quad (1)$$

onde CDF_m é a função de distribuição acumulada do mês m com valores de todos os anos e $CDF_{y,m}$ é a função de distribuição acumulada do mês m do ano y . A varável x é índice utilizado para as variáveis meteorológicas e N é o número de pontos da CDF utilizado, como pode se observar na figura 1.

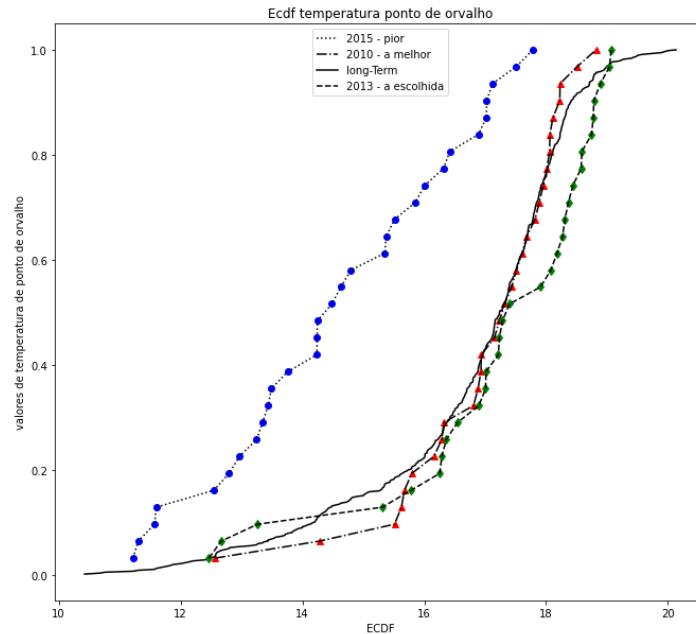


Figura 2 – Gráfico da comparação de CDF's do ponto de orvalho em Brasília (DF). A curva pontilhado com círculos azuis, de 2015, foi considerado com a maior distancia em relação à longa data, na qual está representada por uma linha contínua. Já a linha tracejada com pontos e triângulos vermelhos, de 2010, considerada a com a menor distancia e a linha tracejada com losangos verdes, de 2013, foi a escolhida para compor o YMT, graças aos outros passos.

- Segundo passo:

O próximo passo foi realizar a soma ponderada **WS**, conforme a Eq. 2, utilizada para selecionar os cinco meses que poderão vir a fazer parte do TMY.

$$WS(y, m) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M WF_x \cdot FS_x(y, m) \quad (2)$$

onde **M** é o número de variáveis, **WF** é o fator de ponderação para cada variável **x**.

Os 5 meses candidatos para compor o TMY são ranqueados com base na proximidade com a distribuição para o período completo de dados.

- Terceiro passo:

Foram utilizados critérios de frequência de persistência para cada um dos 5 anos selecionados. Para radiação total global horizontal a persistência é analisada abaixo de 33%, para temperatura média de bulbo seco abaixo de 33% e acima de 67%. O mês com execução mais longa e o com zero execuções são excluídos. Por fim, o mês com o maior ranking que restou é escolhido para o TMY.

- Quarto passo:

Foram realizados os 3 primeiros passos para cada um dos 12 meses do ano para gerar o TMY.

Neste relatório serão apresentados resultados obtidos utilizando séries históricas de 15 a 18 anos de dados coletados nas estações automáticas operadas pelo INMET com medições horárias, no período de 2000 até 2018. As variáveis analisadas foram radiação global total diária, temperatura mínima, temperatura máxima, temperatura de bulbo seco, temperatura de ponto de orvalho (média, mínima e máxima), umidade, velocidade do vento. As variáveis foram medidas em:

- Irradiação global horizontal (KJ/m²)
- Temperatura de bulbo seco (C°)
- Temperatura relativa do ar (C°)
- Temperatura de ponto de orvalho (C°)
- Umidade relativa do ar (%)
- Velocidade do vento (m/s)

Os valores de ponderação utilizados estão apresentados na tabela 1:

variavel	Valores de ponderação
Radiação	12/24
temperatura mínima	1/24
temperatura máxima	1/24
umidade	2/24
temperatura de orvalho maxima	1/24
temperatura media de orvalho	2/24
temperatura de orvalho minima	1/24
temperatura media de bulbo seco	2/24
media velocidade de vento	2/24

Tabela 1 – valores dos pesos utilizados no segundo passo da metodologia de calculo do TMY.

RESULTADOS

Como resultados, foram gerados Anos Meteorológicos Típicos para um total de 54 cidades (Anexo 1), onde fica nítido que localidades que estão próximas, apresentam

o TMY similares e consistentes, fato esse, que indica uma possibilidade para estudar o limite de distância para uso de TMY determinado para localidades próximas à região de interesse de estudo para a qual que o AMT já esteja gerado.

Para analisarmos os resultados, foram avaliados TMY de diversas cidades, como o de Salvador (Tabela 2), na Bahia, e comparamos a média mensal da variável radiação global total diária de cada mês do ano meteorológico típico com a média da mesma variável para todo o período analisado junto a média mensal do ano de 2014 (Figura 3), ano no qual foi analisado por não representar tipicidade e não ser escolhido para compor nenhum mês do TMY. Em seguida foi analisada a similaridade partindo de um gráfico de Boxplot da mesma variável porém apenas com a longa data e os resultados obtidos na região, no qual fica clara a similaridade e a tipicidade do TMY(Figura 4).

Base	Estado	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Salvador	BA	2013	2003	2018	2017	2017	2002	2012	2016	2012	2013	2016	2010

Tabela 2 – TMY de salvador

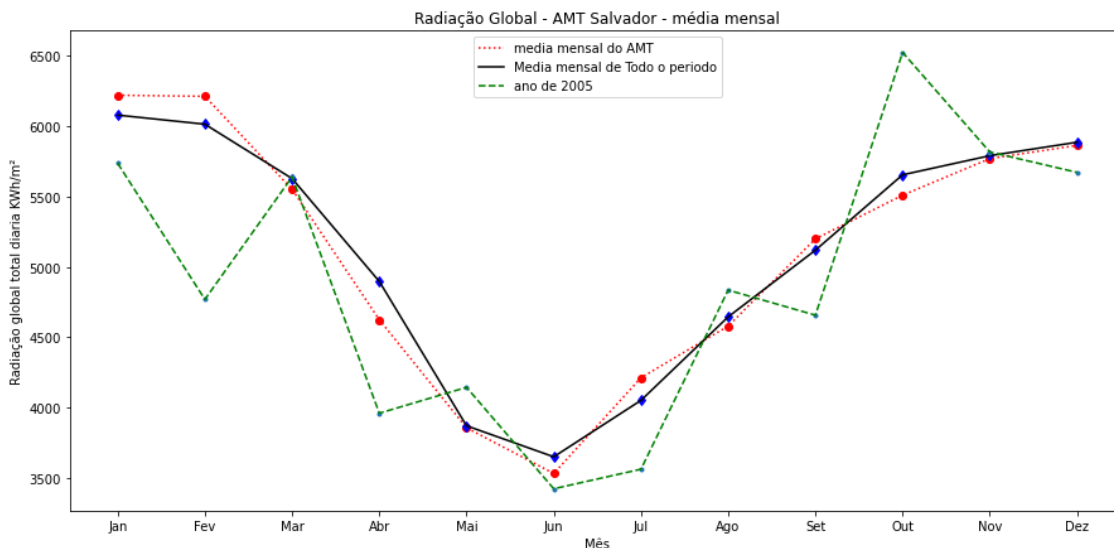


Figura 3 – Comparação entre a média mensal de radiação global total diária coletada em 18 anos representada na linha continua com losangos em azul com a média mensal apresentada em cada mês do YMT de salvador, marcada pela linha pontilhada com círculos vermelhos e a média mensal do ano de 2005, na qual está marcado em verde tracejado com pontos pequenos esverdeados.

Analisando a Figura 3, pode-se observar que a composição obtida para o Ano Meteorológico Típico apresenta valores próximos da variação anual da media mensal

de radiação para o período completo da serie temporal. Por ser uma variável onde o valor de ponderação é elevado, é de se esperar que a média mensal da radiação global do ano meteorológico típico esteja próxima da média mensal comparada em todo período, fato que se encontra visível na Figura 3, mostrando mais similaridade comparada com a média mensal dos meses de 2005.

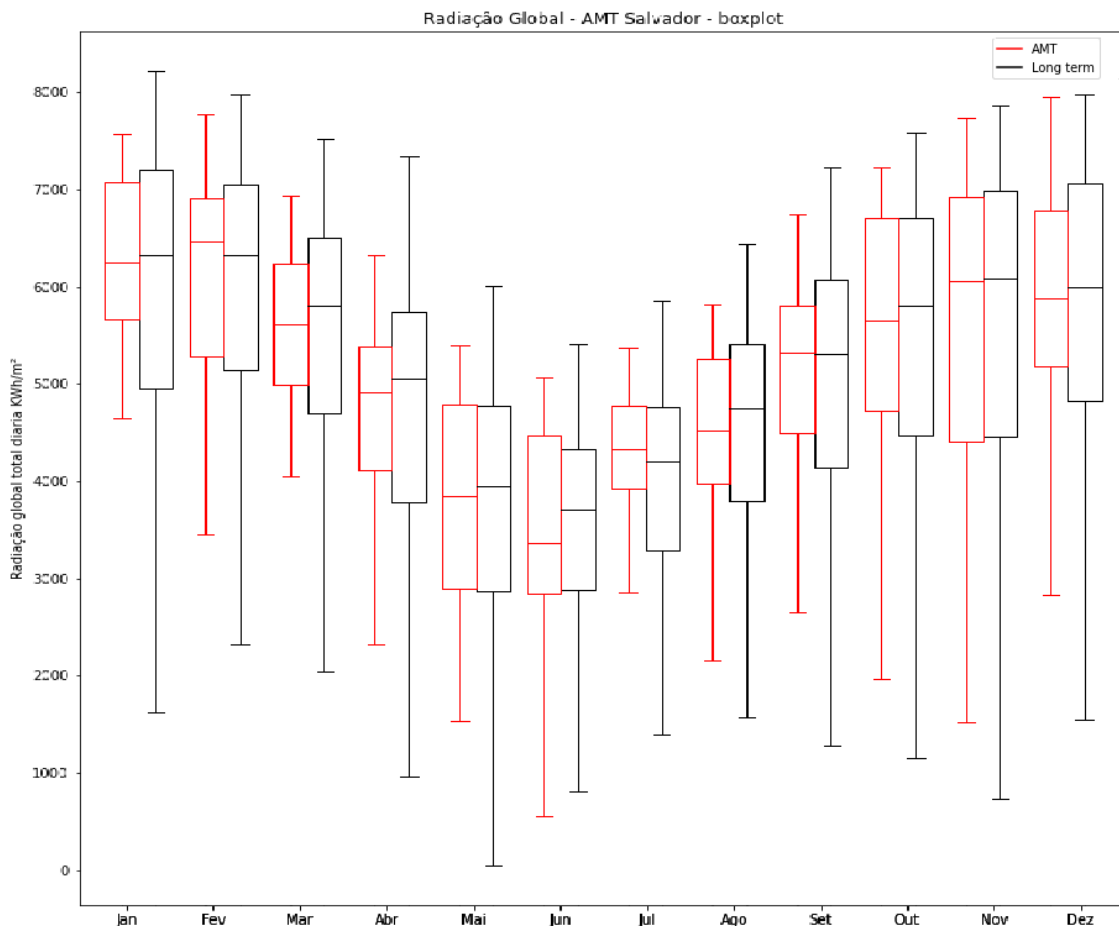


Figura 4 – Gráfico de Boxplot para comparação entre o TMY, representado a esquerda em vermelho, e a longa data, representada a direita em preto, da variável Radiação global total diária.

Ao analisar a Figura 4, observa-se que em alguns meses as medianas estão próximas, além de que os quartis também apresentam tamanhos semelhantes. Logo, é possível perceber a similaridade entre os dois gráficos mostrando que a composição obtida para o Ano Meteorológico Típico apresenta valores próximos da variação anual do período completo da serie temporal.

CONCLUSÕES

O conhecimento das características climatológicas de uma região é de suma importância para o desenvolvimento de projetos para exploração de fontes de energia renovável. Dados de irradiação solar são escassos e uma das técnicas para suprir esta indisponibilidade é justamente a elaboração de um Ano Meteorológico Típico.

Este projeto, iniciado em agosto de 2020 e finalizado em agosto de 2021 teve principais resultados a capacitação do estudante e a elaboração de um software que a partir dos dados meteorológicos disponíveis para uma determinada localidade, realizasse o processamento e a geração de TMY's. Isto foi realizado para um total de 54 cidades no território Brasil junto à comparação dos resultados para medir a similaridade dos mesmos. Estas análises contribuem para um melhor entendimento da disponibilidade do recurso solar no país, fomentando o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias que utilizam o recurso para produção de energia e calor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARGIROU, A.; LYKOURIS, S., 1999. Comparison of Methodologies for TMY Generation Using 20 Years Data for Athens, Greece. *Solar Energy*;1.

HALL, I.; PRAIRIE, R.; ADERSON, H.; BOES, E., 1978. Generation of Typical Meteorological Years for 26 SOLMET Stations. SAND78-1601. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories.

PEREIRA E.B.; MARTINS F.R.; GONÇALVES A.R.; COSTA R.S.; DE LIMA F.J.L.; RÜTHER R.; ABREU S.L.; TIEPOLO G.M.; PEREIRA S.V.; SOUZA J.G. **Atlas Brasileiro de energia solar. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.** São José dos Campos, SP, 2017.

Skeiker, Kamal. **Comparison of methodologies for TMY generation using 10 years data for Damascus, Syria.** *Energy Conversion and Management* 48.7 (2007): 2090-2102.

LUIZ, Eduardo Weide et al. Determinação de um Ano Meteorológico Típico para Florianópolis–SC. In: **IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES.** 2012.

REALPE A. M. et al. Proposing Enhanced Typical Meteorological Year for Concentrated-PV Systems Using Long-Term Datasets. *Solais Expert Photovoltaïque*, 2015.

SKEIKER, K., 2006. Comparison of Methodologies for TMY Generation Using 10 Years Data for Damascus, Syria. Damascus, Syria: Department of Scientific Services.

WILCOX, S.; MARION, W., 2008. Users Manual for TMY3 Data Sets. National Renewable Energy Laboratory.

ANEXO 1 – Resultados de TMY para cidades brasileiras onde séries temporais longas de dados observadas em estações meteorológicas automáticas operadas pelo INMET.

Base	UC	Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Maceio	AL	2011	2015	2015	2014	2013	2011	2014	2011	2013	2011	2017	2015
Manaus	AM	2002	2003	2008	2012	2013	2014	2014	2014	2005	2016	2011	2012
Barreiras	BA	2010	2015	2010	2011	2018	2018	2011	2015	2008	2014	2017	2011
Caravelas	BA	2013	2015	2015	2017	2007	2011	2012	2015	2008	2016	2017	2007
Cruz das Almas	BA	2015	2007	2011	2006	2006	2011	2010	2010	2014	2013	2005	2010
Ilheus	BA	2018	2017	2013	2015	2018	2011	2018	2014	2012	2013	2016	2018
Itaberaba	BA	2015	2013	2015	2016	2014	2014	2018	2017	2012	2014	2013	2016
Itirucu	BA	2011	2008	2011	2014	2014	2014	2007	2011	2014	2013	2016	2011
Luiz Eduardo Magalhaes	BA	2017	2003	2006	2017	2013	2011	2011	2014	2003	2004	2003	2014
Macajuba	BA	2018	2018	2014	2017	2014	2014	2016	2014	2014	2017	2017	2011
Salvador	BA	2013	2003	2018	2017	2017	2002	2012	2016	2012	2013	2016	2010
Fortaleza	CE	2017	2014	2012	2017	2017	2011	2018	2017	2018	2018	2013	2017
Sobral	CE	2017	2008	2014	2014	2013	2010	2015	2014	2008	2013	2007	2012
Brasilia	DF	2008	2018	2013	2003	2006	2011	2001	2013	2018	2003	2017	2017
Goiania	GO	2011	2017	2009	2003	2014	2017	2011	2005	2018	2003	2014	2002
Morrinhos	GO	2002	2007	2017	2008	2014	2017	2005	2005	2013	2016	2014	2002
Sao Luis	MA	2011	2011	2009	2017	2017	2016	2015	2016	2010	2008	2015	2017
Almenara	MG	2014	2011	2015	2015	2013	2014	2010	2013	2010	2012	2014	2014
Araxa	MG	2011	2017	2010	2011	2011	2017	2012	2013	2010	2016	2012	2015
Barbacena	MG	2004	2007	2012	2008	2010	2004	2007	2015	2010	2008	2016	2017
Montes Claros	MG	2011	2017	2018	2015	2018	2011	2012	2015	2012	2016	2014	2018
Uberlandia	MG	2017	2015	2014	2003	2014	2017	2010	2014	2014	2016	2010	2017
Campo Grande	MS	2017	2015	2016	2003	2012	2017	2005	2007	2013	2017	2007	2015
Ivinhema	MS	2006	2015	2013	2011	2014	2014	2012	2016	2013	2013	2007	2007
Ponta Pora	MS	2015	2006	2015	2008	2014	2017	2011	2016	2013	2008	2006	2007
Tres Lagoas	MS	2018	2007	2016	2017	2014	2017	2002	2005	2013	2013	2016	2013
Campo novo dos Parecis	MT	2011	2013	2013	2012	2012	2017	2011	2011	2015	2016	2014	2013
Cuiaba	MT	2013	2018	2016	2012	2003	2008	2012	2016	2004	2013	2014	2007
Guaranta do Norte	MT	2013	2015	2013	2013	2012	2017	2012	2012	2012	2013	2012	2014
Rondonopolis	MT	2017	2017	2013	2012	2014	2015	2011	2015	2013	2013	2017	2014
S.J. Do Rio Claro	MT	2018	2015	2015	2017	2017	2014	2018	2017	2016	2016	2015	2016
Sorriso	MT	2017	2017	2017	2012	2014	2018	2012	2014	2018	2016	2016	2018
Tangara da Serra	MT	2006	2011	2017	2014	2012	2017	2012	2016	2013	2011	2014	2018
Belem	PA	2010	2013	2009	2013	2011	2011	2016	2010	2018	2014	2011	2012
Castanhal	PA	2003	2017	2018	2017	2013	2015	2014	2014	2016	2016	2016	2013
Petrolina	PE	2009	2008	2010	2014	2011	2014	2013	2008	2013	2013	2016	2009
Parnaiba	PI	2018	2011	2012	2010	2017	2013	2010	2010	2017	2018	2016	2010
Curitiba	PR	2016	2007	2014	2012	2014	2010	2005	2009	2010	2006	2014	2014
Cambuci	RJ	2013	2006	2008	2007	2007	2017	2011	2006	2003	2008	2016	2002

Base	UC	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Ecologia Agricola	RJ	2002	2007	2006	2010	2016	2009	2011	2007	2010	2011	2010	2004
Marambaia	RJ	2018	2015	2008	2014	2010	2017	2011	2014	2012	2016	2018	2006
Natal	RN	2015	2015	2014	2014	2014	2014	2014	2014	2016	2015	2011	2013
Porto Alegre	RS	2007	2013	2014	2017	2014	2004	2003	2016	2012	2016	2004	2010
Rio Grande	RS	2017	2013	2017	2011	2008	2011	2010	2016	2005	2017	2014	2016
Santa Maria	RS	2006	2013	2014	2010	2013	2010	2013	2011	2012	2008	2006	2007
Santana do Livramento	RS	2018	2007	2011	2012	2013	2010	2010	2005	2012	2017	2018	2008
Santo Augusto	RS	2002	2006	2018	2006	2015	2018	2016	2016	2013	2017	2014	2010
Florianopolis	SC	2018	2013	2016	2012	2013	2012	2018	2016	2013	2003	2013	2007
Aracaju	SE	2015	2015	2015	2011	2011	2014	2012	2017	2012	2013	2013	2014
Xerem	SE	2018	2015	2016	2014	2014	2015	2011	2013	2010	2011	2010	2002
Bauru	SP	2002	2010	2003	2003	2014	2014	2011	2008	2010	2016	2012	2016
Campos do Jordao	SP	2018	2011	2010	2015	2012	2018	2012	2017	2014	2011	2014	2003
Franca	SP	2018	2015	2005	2017	2013	2004	2012	2011	2010	2016	2006	2015
Presidente Prudente	SP	2013	2009	2010	2011	2010	2017	2011	2011	2013	2016	2012	2013