

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL

ESTUDO DA RADIAÇÃO SOLAR NO MUNICÍPIO DE RIO GRANDE, RS:  
DADOS METEOROLÓGICOS E SIMULAÇÃO

por

Karina Schiavo Seide

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Modelagem Computacional

Rio Grande, fevereiro, 2019

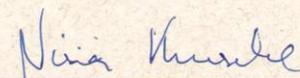
Karina Schiavo Seide

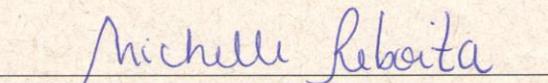
“ Estudo da radiação solar no município de Rio Grande, RS: dados meteorológicos e simulação”

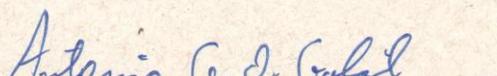
Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área concentração: Modelagem Computacional.

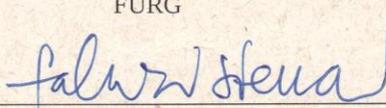
Aprovada em

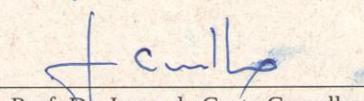
BANCA EXAMINADORA

  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Nisia Krusche  
Orientador – FURG

  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Michelle Simões Reboita  
Coorientadora – Universidade Federal de Itajubá

  
Prof. Dr. Antonio Gledson de Oliveira Goulart  
FURG

  
Prof. Dr. Fabricio Ferrari  
FURG

  
Prof. Dr. Jonas da Costa Carvalho  
UFPEL

Rio Grande, - RS  
2019

## Ficha catalográfica

S458e Seide, Karina Schiavo.  
Estudo da radiação solar no município de Rio Grande, RS: dados meteorológicos e simulação / Karina Schiavo Seide . – 2019.  
62 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Rio Grande/RS, 2019.  
Orientadora: Dra. Nisia Krusche.  
Coorientadora: Dra. Michelle Simões Reboita.

1. Radiação Solar 2. Planejamento de Energia 3. Modelos Climáticos 4. Modelo de Mesoescala I. Krusche, Nisia II. Reboita, Michelle Simões III. Título.

CDU 52-74(816.5RG)

*Se alguma coisa pode dar errado, dará.*

*Edward Murphy*

# AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Sônia e Luis pelo apoio incondicional dado ao longo de toda minha vida.

Ao William pela parceria, companheirismo e suporte em todos os momentos.

Aos colegas Camila e Silva Gomes e Vitor Hugo Marrafon, pelo apoio dado na realização das simulações utilizadas nesse trabalho. E estendo o agradecimento a UFRGS e a UNIFEI, pela disponibilidade dos clusters onde as simulações foram rodadas.

Aos professores David R. Fitzjarrald e Fabrício Ferrari, pelas sugestões de trabalho.

Aos responsáveis pela instalação e manutenção da torre meteorológica na qual obteve-se os dados utilizados no estudo.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia pela disponibilização dos dados da estação automática de Rio Grande – RS.

A orientadora Nisia Krusche e a coorientadora Michelle Simões Reboita pelo apoio e suporte dado para a realização desse estudo.

E principalmente ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

A radiação solar é uma importante fonte de energia limpa. Os crescentes incentivos na utilização de fontes alternativas para a produção de energia elétrica vêm abrindo espaço para os sistemas fotovoltaicos. Nesse sentido é necessário prever a quantidade de radiação solar que chega à superfície para poder estimar a quantidade de energia que será produzida em determinada região. Portanto, o objetivo desse estudo é analisar como dois modelos numéricos regionais (um de clima e outro de tempo) simulam a radiação solar em Rio Grande, RS, para auxiliar na previsão de energia. Foram realizadas 3 simulações para o período de junho de 2014, sendo 2 com o modelo de clima e uma com o modelo de tempo. Os dados simulados foram comparados com dados coletados em uma torre meteorológica, que forneceu informações no período de maio de 2014 a março de 2015. Foram analisados os totais de radiação solar diária e horas de brilho solar. Outra análise do estudo foi a identificação do tipo de sombra de nuvens presente durante o dia. Nesse, identificou-se uma grande incidência de nuvens baixas na região estudada, durante o período de junho a setembro de 2014. Com relação às simulações, o modelo de tempo superestima a radiação solar na maioria dos dias e o modelo de clima a subestima. Entretanto, a correlação do observado com as três simulações apresentadas é alta, chegando a valores muito próximos de um, valor máximo de correlação. De maneira geral, o modelo climático utilizado se mostra mais promissor para a utilização no planejamento energético.

**Palavras-chaves:** Radiação solar, planejamento de energia, modelos climáticos, modelo de mesoescala.

## ABSTRACT

Solar radiation is an important source of clean energy. The growing incentives to use alternative sources for the production of electric energy have made room for photovoltaic systems. In this sense it is necessary to predict the amount of solar radiation that reaches the surface in order to estimate the amount of energy that will be produced in a given region. Therefore, the objective of this study is to analyze how two regional numerical models (one of climate and one of time) simulate the solar radiation in Rio Grande, RS, to assist in the prediction of energy. Three simulations were performed for the period of June 2014, two with the climate model and one with the time model. The simulated data were compared with data collected in a meteorological tower, which provided information from May 2014 to March 2015. Total solar radiation and solar brightness hours were analyzed. Another analysis of the study was the identification of the type of cloud shadow present during the day. In this case, a high incidence of low clouds was identified in the studied region during the period from June to September 2014. Regarding the simulations, the weather model overestimates the solar radiation on most days and the climate model underestimates it. However, the correlation of the observed with the three simulations presented is high, reaching values very close to one, maximum value of correlation. In general, the climate model used is more promising for use in energy planning.

**Keywords:** Solar radiation, energy planning, climate models, mesoscale model.

# ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO .....	14
2. OBJETIVO .....	16
2.1. Objetivos específicos .....	16
3. REFERENCIAL TEÓRICO .....	17
3.1. Radiação solar .....	17
3.2. Energia solar .....	19
3.3. Nuvens .....	20
4. METODOLOGIA .....	23
4.1. Dados meteorológicos .....	23
4.2. Método de análise da sombra das nuvens.....	26
4.3. Modelos de previsão climática e de mesoescala .....	27
4.3.1. RegCM.....	27
4.3.2. WRF .....	29
4.4. Validação das Simulações .....	30
5. RESULTADOS .....	32
5.1. Controle de qualidade das observações .....	32
5.2. Radiação Global.....	33
5.3. Classificação da sombra de nuvens.....	34
5.4. Simulações.....	36
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	41
7. REFERÊNCIAS.....	43
ANEXO 1 .....	45
ANEXO 2 .....	53

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Classificação das nuvens quanto à tipo, formato e altura. Fonte: Cloud Atlas, (WMO, 2017). .....	21
Figura 3.1 - Localização da torre meteorológica (Adaptado do Google Maps, 2018). .....	23
Figura 3.2 – Torre Meteorológica. ....	24
Figura 3.3 – Base da torre, mostrando os painéis solares e compartimentos de armazenamento do datalogger e da bateria (Fonte: Ribas, 2017). ....	24
Figura 3.4 – Equipamentos instalados na torre, radiômetro a esquerda e piranômetro a direita (Fonte: Ribas, 2017). ....	25
Figura 3.5 - Traços de registro típicos que ilustram as variações na luz refletida de diferentes tipos de nuvens. Fonte: Falconer, 1965. ....	27
Figura 4.1 – Total de radiação diária observado, em azul, e teórico, em preto. O eixo das abcissas representa os dias do ano e no eixo das ordenadas a quantidade de radiação solar em $W/m^2$ . ....	32
Figura 4.2 - Total de horas de brilho solar observado, em azul, em comparação ao teórico, em preto. O eixo das abcissas representa os dias do ano e no eixo das ordenadas a quantidade de horas. ....	32
Figura 4.3 – Total diário de radiação global observada para o período de maio de 2014 a abril de 2015. O eixo das abcissas representa os dias do ano e o eixo das ordenadas os totais diários de radiação solar em $W/m^2$ . ....	33
Figura 4.4 – Total mensal de radiação global observada para o período de maio de 2014 a abril de 2015. O eixo das abcissas representa os meses e o eixo das ordenadas os totais mensais de radiação solar em $W/m^2$ . ....	34
Figura 4.5 – Classificação de nuvens para os dias 17 a 22 de julho de 2014, conforme Falconer (1965) .....	35
Figura 4.6 – Total de radiação diário para os dias 1 a 15 de junho. Observado, em azul, simulação RegCM-BATS, em laranja, simulação RegCM-CLM, em verde, e simulação WRF em amarelo. ....	37
Figura 4.7 – Total de radiação diário para os dias 17 a 30 de junho de 2014. Observado, em azul, simulação RegCM-BATS, em laranja, simulação RegCM-CLM, em verde, e simulação WRF em amarelo. ....	37
Figura 4.8 – Comparação entre dados observados, no eixo da abcissa, e simulação utilizando o WRF, do eixo das ordenadas. Os dados são de radiação solar em $W/m^2$ . ....	38

Figura 4.9 – Comparação entre dados observados, no eixo da abscissa, as simulações do RegCM, do eixo das ordenadas. A simulação RegCM-BATS em comparação com o observado está em vermelho e a simulação RegCM-CLM em comparação com o observado está em verde. Os dados são de radiação solar em $W/m^2$ . .....	39
Figura 4.10 – Comparação dos totais mensais entre dados observados e simulações para o período de junho de 2014 a março de 2015. Observado, em azul, simulação RegCM-BATS, em laranja e simulação RegCM-CLM, em verde. ....	40
Figura 4.11 – Totais sazonais entre os dados observados e as simulações do RegCM. Observado, em azul, simulação RegCM-BATS, em laranja, simulação RegCM-CLM, em verde.....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Altitudes aproximadas de cada nível e gêneros de nuvens associadas. Fonte: Adaptado do <i>International cloud atlas</i> (WMO, 2017). .....	20
Tabela 4-1 – Correlação, erro absoluto médio (MAE), erro absoluto relativo (RAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE), raiz do erro quadrático relativo (RRSE), para a radiação solar observada em comparação com as simulações realizadas, para o mês de junho de 2014.....	36
Tabela 4-2 – Correlação, erro absoluto médio (MAE), erro absoluto relativo (RAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE), raiz do erro quadrático relativo (RRSE), para a radiação solar observada em comparação com as simulações realizadas, para o período de junho de 2014 a março de 2015, em totais mensal. ....	39

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Gamma$	Ângulo do dia do ano
$\delta$	Declinação solar
$d_n$	Dias do ano, onde 1º de janeiro representa 1 e 31 de dezembro representa 365
$E_0$	Fator de correção da excentricidade da Terra
$\phi$	Latitude do local
$\omega_s$	Ângulo horário de nascer do sol
$r_0$	Distância média da Terra ao Sol
$r$	Distância instantânea da Terra ao Sol
$I_{sc}$	Constante solar
$H_0$	Total de radiação solar diária
$N_d$	Total de horas de brilho solar diário

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
RegCM	<i>Regional Climate Model</i>
WRF	<i>Weather Research and Forecasting</i>
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
ESP	<i>Earth System Physics</i>
ICTP	<i>International Centre for Theoretical Physics</i>
MAE	<i>Mean Absolute Error</i>
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i>
RAE	<i>Relative Absolute Error</i>
RRSE	<i>Root Relative Squared Error</i>
CLM	<i>Community Land Model</i>
BATS	<i>Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme</i>

## 1. INTRODUÇÃO

Inovação e tecnologia vêm transformando as formas de produção e consumo da população. Produzir menos lixo, diminuir os impactos ambientais e utilizar meios alternativos de produção de energia são assuntos que vêm sendo discutidos em diversos encontros mundiais.

No Brasil mais de 80% da energia elétrica produzida é hidroelétrica (ANEEL, 2005). Embora seja considerada uma forma de produção limpa, a instalação de uma usina hidrelétrica tem grandes impactos ambientais. Em muitos casos é necessário desviar o curso dos rios e inundar grandes áreas, o que afeta a fauna e flora local. Ainda é necessário considerar as grandes torres de distribuição que são necessárias para levar a energia até os consumidores, tornando, em alguns lugares, o acesso à energia elétrica mais restrito.

Fontes alternativas de produção de energia elétrica aparecem como opções para produção de forma mais limpa e sustentável e como forma de ampliar a gama das matrizes energéticas. Em 2004 o Ministério de Minas e Energia criou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica com o objetivo de desenvolver fontes alternativas e renováveis de energia para a produção de eletricidade, levando em conta características e potencialidades regionais e locais, e investiu na redução de emissões de gases de efeito estufa (BRASIL, [s.d.]). Os incentivos financeiros provenientes desse programa beneficiaram de forma geral a construção de parques eólicos, usinas de biomassa e pequenas centrais hidrelétricas.

Embora existam incentivos para a produção de energia a partir de fontes renováveis, muito ainda necessita ser feito. Com relação à energia solar, um dos principais diferenciais é que ela pode ser produzida e utilizada no próprio local de fabricação, sem precisar de grandes centros de distribuição e armazenamento, e o excedente pode ser disponibilizado no sistema elétrico já existente, caso exista. Dessa forma, é possível popularizar o acesso à energia, principalmente em local de difícil acesso.

Segundo o boletim de informações gerenciais de dezembro de 2017, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), existem 81 centrais geradoras de energia solar fotovoltaica em funcionamento no Brasil, representando apenas 0,6% do total de potência instalada no país. Esse número é muito pequeno tendo em vista o potencial solar existente no país.

Alguns países se destacam na produção de energia solar como a Alemanha e a China. Nesses existem grandes parques solares e um investimento muito grande em pesquisa e tecnologia para melhorar os sistemas de captação e armazenamento.

Para a implementação de um sistema solar é necessário fazer uma análise de viabilidade, isto é, se o local é uma fonte da referida energia. Além disso, busca-se o conhecimento dessas características médias da radiação solar da região onde o equipamento será instalado. Nesse sentido, realizar estudos voltados à radiação solar são relevantes para melhorar e incentivar a sua utilização como fonte de energia. Também é necessário estudar os fatos que influenciam na quantidade de radiação solar que chega à superfície como, por exemplo, as nuvens e o tipo de céu e entender como os modelos de previsão numérica simulam a radiação solar para auxiliar nos processos de planejamento da energia solar.

Existem dois tipos principais de modelos de previsão numérica, os que simulam o tempo, ou seja, as condições meteorológicas instantâneas em um determinado local para um período de tempo pequeno, envolvendo de horas a dias, e os que simulam o clima, ou seja, a condição média da atmosfera durante um longo período de tempo, podendo envolver meses e anos.

Segundo Porrini et al. (2012), o modelo de previsão de tempo WRF teve aprimoramento que melhoram a previsão da radiação solar incidente, simulando com mais acurácia os valores em comparação com versões anteriores do programa, nos estudos realizados para o Uruguai. Porém, Porrini e Boezio (2017) observaram que as simulações numéricas com o modelo WRF para o período do verão entre os anos de 2013-2014 a 2016-2017, superestimam os valores de radiação solar diária, principalmente devido à dificuldade relacionada à previsão de nuvens baixas.

Sendo assim, é necessário estudar como os modelos de previsão numérica de tempo e clima se comportam simulando a radiação solar diária. Para entender qual a melhor opção para o planejamento energético.

## **2. OBJETIVO**

O objetivo dessa pesquisa é verificar se dois modelos numéricos de previsão (um de tempo e outro de clima) representam adequadamente a incidência de radiação solar diária em Rio Grande, RS, no período de junho de 2014 a março de 2015.

### **2.1. Objetivos específicos**

- Realizar uma análise da radiação solar local através de dados meteorológicos
- Verificar o tipo de nuvem mais frequente durante o dia na região estudada.
- Comparar dados de simulação de radiação solar com dados reais.
- Identificar o modelo que representa a radiação solar diária de forma mais adequada.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção são apresentados alguns conceitos básicos relacionados à radiação solar, energia solar e nuvens.

#### 3.1. Radiação solar

Radiação solar é a transferência de energia por meio de ondas eletromagnéticas. Essas ondas possuem diferentes comprimentos, propagando-se no espaço a velocidade da luz (YNOUE et al., 2017). A maior parte da energia solar emitida é de onda curta. A radiação solar é isotrópica, isto significa que cada ponto da superfície do sol emite radiação com a mesma intensidade em todas as direções.

A radiação solar pode ser direta, quando uma fração da radiação solar não sofre interações até chegar na superfície, difusa quando interage com os constituintes da atmosfera alterando a sua direção. A radiação global é a soma da radiação direta com a radiação difusa.

A radiação solar que chega no topo da atmosfera terrestre passa por diversos processos até chegar na superfície. Parte da radiação é absorvida pelos gases da atmosfera, e cerca de 30% da radiação é refletida de volta ao espaço, por conta do albedo terrestre. Localmente a radiação pode ser refletida em até 80% devido às nuvens (STRAHLER, 2010).

Outro processo que envolve a radiação é a dispersão. A maior parte da luz que atinge nossos olhos não vem diretamente de sua fonte, mas indiretamente através do processo de dispersão ao interagir com gases e partículas em suspensão na atmosfera. Na atmosfera, existem muitos exemplos coloridos do espalhamento gerados por moléculas, aerossóis e nuvens contendo gotículas de água e cristais de gelo. O céu azul, as nuvens brancas, os arco-íris e halos, são todos fenômenos ópticos produzidos pela dispersão (LIOU, 1980).

Espalhamento é um processo físico fundamental associado à luz e sua interação com a matéria. Ocorre em todos os comprimentos de onda por todo o espectro eletromagnético (LIOU, 1980). Na atmosfera o espalhamento ocorre principalmente pelos gases, aerossóis, gotículas de água e cristais de gelo.

A constante solar é a taxa de energia solar total em todos os comprimentos de onda incidentes em uma área de unidade exposta normalmente aos raios do Sol. Como a energia

viaja quase sem interferência entre o Sol e o topo da atmosfera terrestres, seu valor é praticamente constante e é equivalente a  $1367 W/m^2$ .

Embora a energia que chega no topo da atmosfera da Terra seja considerada constante a quantidade que chega na superfície é diferente em cada parte do globo terrestre. A quantidade de energia depende da declinação solar, do ângulo horário de nascer do Sol e da excentricidade da órbita terrestre que mudam com o passar do ano e são diferentes para cada latitude.

A declinação solar é o ângulo formado entre uma linha imaginária ligando o centro da Terra ao centro do Sol, com o plano do Equador, variando ao longo do ano entre  $\pm 23,5$ . A declinação do Sol tem papel fundamental na definição das estações do ano (Iqbal, 1983). Pode ser calcula através da equação (2.1), obtida de Iqbal (1983),

$$\delta = (0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 0.006758 \cos 2\Gamma + 0.000907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma)(180/\pi) \quad (3.1)$$

$$\Gamma = 2\pi \frac{(d_n - 1)}{365} \quad (3.2)$$

onde  $\Gamma$  representa o ângulo do dia e pode ser calculado através da equação (2.2),  $d_n$  são os dias do ano, onde 1º de janeiro representa 1 e 31 de dezembro representa 365.

O ângulo horário de nascer do Sol pode ser calculado através da equação (2.3):

$$\omega_s = \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (3.3)$$

onde  $\phi$  representa a latitude do local para o qual se deseja calcular e  $\delta$  a declinação solar.

A Terra gira em torno do Sol em uma órbita elíptica, entretanto, devido à atração gravitacional e influência do Sol existe um achatamento da elipse em círculo (Iqbal, 1983). Sendo assim, a variação entre a distância média entre a terra e o Sol e a distância instantânea caracteriza o fator de correção da excentricidade. O fator de correção da excentricidade ( $E_0$ ) pode ser calculado através da equação (2.4):

$$E_0 = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = 1 + 0.033 \cos \left[\left(\frac{2\pi d_n}{365}\right)\right] \quad (3.4)$$

### 3.2. Energia solar

A transferência de energia do Sol para a Terra ocorre através da radiação. A quantidade de energia proveniente do Sol que chega na superfície tem um valor muito grande. É a partir dessa energia que diversos processos indispensáveis ocorrem na Terra como, por exemplo, a evaporação, a fotossíntese e a circulação atmosférica.

A energia solar é utilizada para a geração de energia térmica, utilizada principalmente em equipamentos que visam o aquecimento e a energia solar fotovoltaica, utilizada na geração de energia elétrica. A energia solar térmica leva em consideração a quantidade de energia que um corpo pode absorver sob a forma de calor a partir da radiação solar incidente sobre ele. Os equipamentos mais utilizados para esse fim são os coletores solares, utilizados principalmente para aquecimento de água, ar quente para secagem de grãos, aquecimento de piscinas, entre outros, em residências e empreendimentos comerciais.

Em termos globais estima-se que a potência instalada acumulada no mundo, apenas para aquecimento de água e geração de calor, atingiu 232 GWth ao final de 2011, o que representa o uso de uma área aproximada de 330 milhões de m<sup>2</sup>. Mais de 200 milhões de residências no mundo usam coletores solares para aquecimento de água. No Brasil, a área acumulada atingiu 8,49 milhões de m<sup>2</sup>, o que supera 5,7 GWth, sendo 1,15 milhão de m<sup>2</sup> acrescentados apenas em 2012 (PINHO; GALDINO, 2014).

Uma grande vantagem dos sistemas solares térmicos é a possibilidade de serem acoplados a sistemas de armazenamento de calor para uso em outros horários, que não coincidem com a incidência solar. Isso traz uma maior flexibilidade no despacho de energia elétrica, em comparação aos sistemas fotovoltaicos, além de maior eficiência no processo de conversão de energia e de uma gama de aplicação mais ampla. Outra vantagem é a possibilidade de integração com outras aplicações que necessitem de energia térmica.

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (efeito fotovoltaico), sendo a célula fotovoltaica, um dispositivo fabricado com material semicondutor, a unidade fundamental desse processo de conversão. O aproveitamento dessa radiação em eletricidade varia ao longo do ano e de acordo com a localização geográfica, estação do ano, inclinação dos painéis e outros fatores.

A orientação dos painéis leva em consideração a orientação horizontal, ou seja, se estão voltados ao norte, sul, leste ou oeste. No Brasil, assim como em todos os locais situados ao sul do Equador, os geradores solares fotovoltaicos devem ser orientados ao norte, para maximizar a energia coletada ao longo do ano.

A energia produzida pode ser armazenada em baterias e pequenos geradores, para o abastecimento da residência. Hoje já é possível inclusive devolver o excedente de energia produzida para a rede elétrica das companhias. Embora o investimento para a instalação de um sistema fotovoltaico seja alto o retorno é perceptível na conta de energia elétrica, e o investimento se paga num período em torno de 6 e 10 anos.

### 3.3. Nuvens

Nuvem é um conjunto visível de partículas minúsculas de água líquida ou gelo, ou de ambas ao mesmo tempo, em suspensão na atmosfera. Alguns são encontrados apenas em altitudes elevadas, enquanto outros quase tocam a superfície. (AHRENS, 2000).

Nuvens se formam quando o ar se torna supersaturado em relação à água líquida. O meio mais comum pelo qual a supersaturação é produzida na atmosfera é através da ascensão de parcelas de ar, o que resulta na expansão do ar e do arrefecimento adiabático. Sob estas condições, o vapor de água condensa em algumas das partículas no ar para formar uma nuvem de pequenas gotas de água ou partículas de gelo (WALLACE; HOBBS, 2006).

As nuvens podem ser encontradas em diferentes altitudes, variando do nível do mar ao topo da troposfera (a tropopausa). A tabela 2.1 mostra as diferentes altitudes associada com as nuvens baixas, médias e altas.

Tabela 3-1 – Altitudes aproximadas de cada nível e gêneros de nuvens associadas. Fonte: Adaptado do *International cloud atlas* (WMO, 2017).

<i>Nível</i>	<i>Genero</i>	<i>Regiões Polar</i>	<i>Regiões Temperadas</i>	<i>Regiões Tropicais</i>
<b>Alto</b>	Cirrus Cirrocumulus Cirrostratus	3 – 8 km (10.000 – 25 000 ft)	5 – 13 km (16 500 – 45 000 ft)	6 –18 km (20 000 – 60 000 ft)
<b>Médio</b>	Alto cumulus Altostratus Nimbostratus	2 – 4km (6 500 – 13 000 ft)	2 – 7 km (6 500 – 23 000 ft)	2 – 8 km (6 500 – 25 000 ft)
<b>Baixo</b>	Stratus Stratocumulus Cumulus Cumulonimbus	Da superfície da Terra até 2 km (0 – 6 500ft)	Da superfície da Terra até 2 km (0 – 6 500ft)	Da superfície da Terra até 2 km (0 – 6 500ft)

As nuvens evoluem continuamente e aparecem em uma infinita variedade de formas. No entanto, existe um número limitado de formas características frequentemente observadas em todo o mundo, nas quais as nuvens podem ser agrupadas em um esquema de classificação (WMO, 2017). O esquema usa gêneros, espécies e variedades. Isso é semelhante aos sistemas usados na classificação de plantas ou animais e, da mesma forma, usa nomes latinos.

A classificação das nuvens tem dez grupos principais, chamados de gêneros. Cada nuvem observada é membro de um, e apenas um, gênero (WMO, 2017). Existem 10 tipos de nuvens. Cirrus (Ci), Cirrocumulus (Cc), Cirrostratus (Cs), aparecem com mais frequência no nível alto. Altopcumulus (Ac), Altostratus (As), Nimbostratus (Ns), surgem no nível médio. E Stratus (St), Stratocumulus (Sc), Cumulus (Cu) e Cumulonimbus (Cb), no nível baixo. Entretanto, a extensão das nuvens pode ultrapassar os níveis. A figura 2.2, mostra os tipos de nuvens citados, seus formatos característicos e alturas.

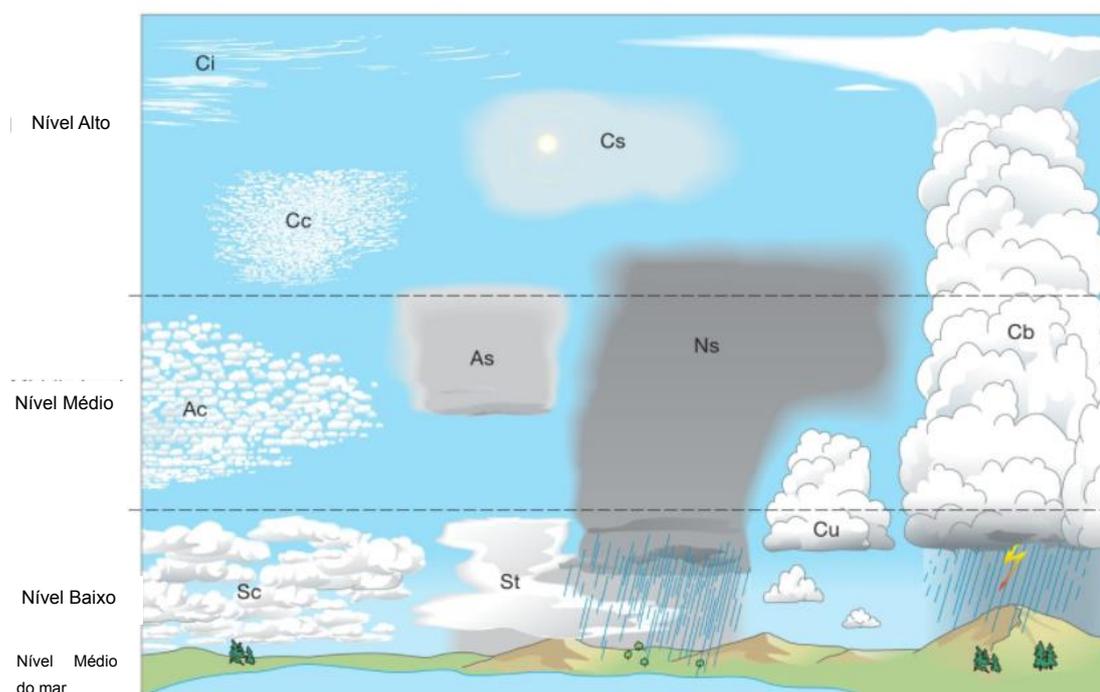


Figura 3.1 – Classificação das nuvens quanto à tipo, formato e altura. Fonte: Cloud Atlas, (WMO, 2017).

A maioria dos gêneros é subdividida em espécies, baseada na forma das nuvens ou em sua estrutura interna. Uma nuvem, observada no céu e identificada como um gênero

específico, pode levar o nome de apenas uma espécie. Variedades são arranjos diferentes dos elementos visíveis das nuvens e diferentes graus de transparência (WMO, 2017).

## 4. METODOLOGIA

Neste trabalho foram usados dados medidos durante o período maio de 2014 a março de 2015, a uma frequência de 1Hz. Inicialmente foi feito o processamento desses dados através do ajuste do tempo em relação ao horário local e controle de qualidade para retirar a informação de radiação durante o período da noite, quando isso ocorreu indevidamente. Os dados foram agrupados em médias de minuto para a análise da sombra das nuvens, em médias diárias e mensais para análise da radiação local e em médias de uma e de seis horas para comparação com as simulações numéricas. As simulações numéricas foram realizadas com dois modelos: um de clima, o *Regional Climate Model* (RegCM), e um de tempo *Weather Research and Forecasting* (WRF).

### 4.1. Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos utilizando nessa pesquisa foram obtidos através de uma torre meteorológica situada na Universidade Federal do Rio Grande, no município de Rio Grande, Rio Grande do Sul. A torre está localizada nas coordenadas  $32^{\circ}04'10.7''S$  e  $52^{\circ}10'8.2''W$  (Figura 3.1).



Figura 4.1 - Localização da torre meteorológica (Adaptado do Google Maps, 2018).

A torre possui 50 metros de altura (Figura 3.2). A estrutura de funcionamento da torre é composta por dois painéis solares, uma bateria e um datalogger modelo CR5000 (Figura 3.3), marca Campbell Scientific e conta com diversos equipamentos instalados.



Figura 4.2 – Torre Meteorológica.



Figura 4.3 – Base da torre, mostrando os painéis solares e compartimentos de armazenamento do datalogger e da bateria (Fonte: Ribas, 2017).

Nessa pesquisa foram utilizados os dados com frequência de 1Hz, captados pelo piranômetro, modelo 11696, série CMP3, da marca Campbell Scientific e pelo radiômetro, modelo NR-LITE, marca Kipp&Zonen, ambos instalados a 6 metros (Figura 3.4). Para maior confiabilidade nos resultados obtidos foram utilizados apenas os dias que possuíam 86400 dados, que caracteriza o dia completo. Sendo descartados os dias que apresentaram quantidades inferiores de dados.



Figura 4.4 – Equipamentos instalados na torre, radiômetro a esquerda e piranômetro a direita (Fonte: Ribas, 2017).

Como até o início desse estudo os dados de radiação solar registrados pela torre não haviam sido utilizados em nenhum estudo foi necessária a realização de um controle de qualidade. Inicialmente foi necessário ajustar o horário dos dados para a hora local, já que os dados de saída são em UTC. Foi realizada uma correção nos dados de radiação global, buscado eliminar ruídos no período de 21 a 5 horas, onde a radiação solar global deve ser zero.

Foram utilizadas as equações propostas por Iqbal (1983), visando comparar os dados observados com os referenciais teóricos. Foram utilizadas as equações de total de radiação diária em uma superfície horizontal ( $H_0$ ) (Equação 3.1):

$$H_0 = \frac{1}{\pi} I_{sc} E_0 \left[ \left( \frac{\pi}{180} \right) \omega_s (\sin \delta \sin \phi) + (\cos \delta \cos \phi \sin \omega_s) \right] \quad (4.1)$$

onde  $I_{sc}$  representa a constante solar, tendo sido utilizado o valor de  $I_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$ ;  $E_0$  representa a excentricidade da Terra;  $\omega_s$  é o ângulo horário do Sol;  $\delta$  representa a declinação solar e  $\phi$  representa a latitude.

Através da equação 3.2, foi possível calcular o total de horas de brilho solar diário ( $N_d$ ).

$$N_d = \frac{2}{15} \omega_s \quad (4.2)$$

Para a análise das sombras de nuvens foram utilizados apenas os dias com nuvem sem presença de precipitação. Para verificar a presença ou não de chuva foram utilizados os dados da estação automática de Rio Grande, monitorada pelo Instituto Nacional de Meteorologia.

## 4.2. Método de análise da sombra das nuvens

Para a análise do tipo de nuvem presente durante o dia, foi utilizado o método de identificação proposto por Falconer (1965). O autor foi um dos pioneiros na classificação do tipo de nuvem examinando séries temporais de incidência de luz na superfície. Ele desenvolveu um método para distinguir as características temporais dos tipos de nuvem, examinando a amplitude e a forma de traços de registros gráficos, emitidos a partir de um fototubo voltado para o norte, para garantir que se medisse apenas radiação difusa e refletida.

Falconer (1965) apresenta treze descrições de traçados. Descreve que o céu limpo é identificado por um traço constante e suave, cumulus apresentam desvios agudos e frequentes, stratocumulos apresentam um traço irregular e alto, altostratus com um traçado com poucas deflexões, altocumulos apresenta deflexões pequenas a moderadas e cirrus apresentam pequenas deflexões suaves e arredondadas, conforme exemplificado na figura 3.5. Essas informações foram utilizadas para a identificação visual das nuvens no período desse estudo.

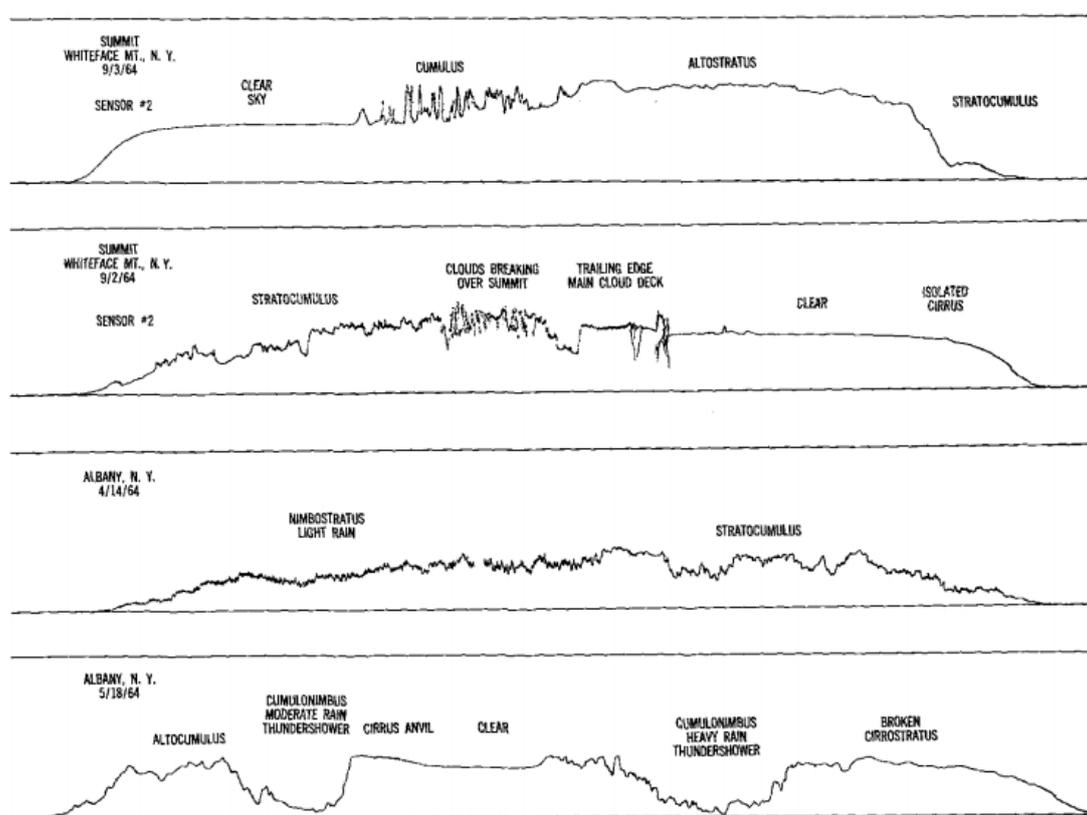


Figura 4.5 - Traços de registro típicos que ilustram as variações na luz refletida de diferentes tipos de nuvens. Fonte: Falconer, 1965.

### 4.3. Modelos de previsão climática e de mesoescala

Para o desenvolvimento dessa pesquisa foram utilizados dois modelos de previsão: um de tempo e outro de clima.

#### 4.3.1. RegCM

*Regional Climate Model* (RegCM) foi desenvolvido pelo *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), e hoje é mantido na *Earth System Physics* (ESP) do *International Centre for Theoretical Physics* (ICTP). Sua primeira versão disponível em 1989. A versão mais recente é a versão 4.7.1. Pode ser aplicado em qualquer região do mundo, com espaçamento de até 10 km quando considerada a versão hidrostática.

As simulações do RegCM foram feitas utilizando a versão 4.6 do programa, rodando no cluster da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). As simulações utilizaram uma resolução de 25 km, para a área delimitada pelas latitudes de 40° e 20°D e longitudes de 60° a 40° W, com projeção cartográfica de Mercator. Para os dados de condição inicial

foi utilizada a reanálise ERA-Interim com resolução horizontal de  $0.75^\circ$ . Foram feitas duas rodadas uma utilizando como parametrização de superfície o esquema de *Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme* (BATS, DICKINSON et al., 1986) e outra com *Community Land Model* (CLM).

As simulações foram feitas no período de 2013 a 2015, utilizando como spin-up do modelo todo o ano de 2013. Os dados obtidos possuem frequência de 6 em 6 horas.

BATS é um esquema de parametrização dos processos na interface superfície-atmosfera para descrever o papel da vegetação e a interatividade do solo na modificação das trocas superfície-atmosfera do momento, energia e vapor de água (ver DICKINSON et al., 1986 para detalhes). O modelo tem uma camada de vegetação, uma camada de neve, uma camada superficial do solo, 10 cm de espessura, ou uma camada de zona de raiz, 1-2 m de espessura, e uma terceira camada profunda do solo de 3 m de espessura. A temperatura da cobertura da copa e da copa é calculada diagnosticamente através de uma formulação de balanço energético incluindo fluxos de calor sensíveis, radiativos e latentes.

*Community Land Model* (CLM) é o modelo de superfície terrestre desenvolvido pelo Centro Nacional de Pesquisa Atmosférica (NCAR) como parte do Modelo de Sistema Climático Comunitário (CCSM), descrito em detalhes em Collins et al. (2006). A versão 3.5 do CLM foi acoplada ao RegCM para uma opção mais detalhada de descrição da superfície terrestre. O CLM contém cinco camadas possíveis de neve com uma representação adicional de neve residual e dez camadas de solo desigualmente espaçadas com soluções explícitas de temperatura, água líquida e água gelada em cada camada. Cada CLMgridcell contém até quatro tipos diferentes de cobertura de terra (glaciar, pântano, lago e vegetação), onde a fração vegetada pode ser dividida em 17 tipos diferentes de plantas. Equações hidrológicas e de balanço de energia são resolvidas para cada tipo de cobertura da terra e agregadas de volta ao nível da célula de grade. Como o CLM foi desenvolvido para a escala global, vários arquivos e processos de entrada foram modificados para torná-lo mais apropriado para simulações regionais, incluindo (1) o uso de dados de entrada de alta resolução, (2) inicialização de umidade do solo e (3) e melhor tratamento das células da grade ao longo das costas. O número de cores do solo foi ampliado de 8 para 20 classes para resolver variações regionais. A segunda modificação foi para atualizar a inicialização da umidade do solo com base em uma umidade climatológica do solo sobre o uso de umidade constante do solo em toda a grade geralmente usada para CLM global. Usando uma média climatológica para a umidade do solo, o tempo de rotação do modelo é reduzido

em relação às camadas mais profundas do solo. A terceira modificação no CLM é a inclusão de uma abordagem em mosaico para células de grade que contêm tipos de superfície terrestre e oceânica. Este método fornece uma melhor representação dos litorais usando os dados da fração de terra de alta resolução.

#### 4.3.2. WRF

*Weather Research and Forecasting (WRF)* é um sistema de previsão de tempo a projetado para aplicações de pesquisa atmosférica e previsão operacional. Ele possui dois núcleos dinâmicos, um sistema de assimilação de dados e uma arquitetura de software que suporta computação paralela e extensibilidade do sistema. O modelo serve uma ampla gama de aplicações meteorológicas em escalas de dezenas de metros a milhares de quilômetros. O esforço para desenvolver o WRF começou na parte final da década de 1990 e foi uma parceria colaborativa do Centro Nacional de Pesquisa Atmosférica (NCAR), a Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (representada pelos Centros Nacionais de Previsão Ambiental (NCEP) e o Forecast Systems Laboratory (FSL)), a Agência Meteorológica da Força Aérea (AFWA), o Laboratório de Pesquisa Naval, a Universidade de Oklahoma e a Federal Aviation Administration (FAA).

O WRF é aberto, gratuito e colaborativo e pode produzir simulações com base nas condições atmosféricas reais (ou seja, a partir de observações e análises) ou condições idealizadas. O WRF oferece à previsão operacional uma plataforma flexível e computacionalmente eficiente, ao mesmo tempo em que reflete os recentes avanços em física, numéricos e assimilação de dados contribuídos pelos desenvolvedores da comunidade de pesquisa expansiva.

As simulações do WRF foram feitas utilizando a versão 4.0, rodando no Cluster da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFGRS). Como condições iniciais e de fronteira do WRF foram utilizados os dados FNL-NCEP, com resolução horizontal de  $1^\circ \times 1^\circ$  de longitude e latitude, 27 níveis verticais e resolução temporal de 6 horas disponíveis em: <https://rda.ucar.edu>. Foi utilizada resolução horizontal de 5 km, para a área determinada pelas latitudes de  $-33$  a  $-30^\circ\text{D}$  e longitudes de  $-55$  a  $-50^\circ\text{W}$  aplicando a técnica de nudging que foi introduzida por (HOKE; ANTHES, 1976), esta técnica permite realização de simulações por um tempo maior e não precisa de spin-up. Consiste em adicionar um termo não físico a uma ou algumas equações do modelo, proporcional à diferença entre a previsão e a observação. Esta assimilação de dados tem sido utilizada em inúmeras aplicações que

envolvem modelos de mesoescala que utilizam equações prognósticas e tem se mostrado muito eficiente para a redução de erros nos modelos (STAUFFER; SEAMAN, 1989).

A parametrização de microfísica utilizada foi a de Ferrier que prevê mudanças no vapor de água e nas formas de condensação da água de nuvem, da chuva, do gelo de nuvem, e do gelo precipitado (SKAMAROCK et al., 2008).

A parametrização de radiação de onda longa e onda curta utilizada compõe uma versão otimizada do modelo de transferência rápida de radiação composta por diferentes módulos que interagem entre si, sendo eles: direção de radiação, constantes físicas e matemáticas, controladores de variáveis e parâmetros de modelos físicos, atmosfera climatológica com esquemas de aerossóis para computação de radiação, controlador de radiação solar astronômica, ajustes para o perfil de ozônio climatológico e outros gases, como Dióxido de Enxofre, metano, Óxido nitroso, oxigênio e os clorofluorcarbonetos. Além de módulos que calculam a interação da radiação solar com as nuvens e ajustam a superfície de albedo para a radiação de onda curta e superfície emissiva para a radiação de onda longa (HOU; MOORTHI; CAMPANA, 2002).

A parametrização de camada limite planetária utilizada foi um esquema de fechamento de primeira ordem proposto por Hong; Noh; Dudhia (2006), que incorpora um termo explícito para o tratamento da zona de entranhamento (Banks et al., 2016). A altura desta camada é determinada a partir do número de Richardson (RIB), usando o valor crítico de 0 para a camada limite estável e 0.25 para camada limite convectiva (BANKS et al., 2016).

#### **4.4. Validação das Simulações**

Para avaliar as simulações, utilizaram-se as medidas de qualidade das previsões de séries temporais: correlação, erro absoluto médio (MAE - Mean Absolute Error); raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE - Root Mean Squared Error), erro absoluto relativo (RAE - Relative Absolute Error) e raiz quadrada do erro quadrático relativo (RRSE - Root Relative Squared Error) (WILKS, 2006).

O coeficiente de correlação ( $r_{xy}$ , Equação 3.3) mede a correlação estatística entre os valores previstos e reais. Na correlação quanto mais próximo de 1 for o resultado significa um modelo melhor e quanto mais perto de 0 significa que não a correlação alguma.

$$r_{xy} = \frac{Cov(x,y)}{S_x S_y} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2}} = \frac{\sum_{i=1}^n (x'_i y'_i)}{[\sum_{i=1}^n (x'_i)^2]^{1/2} [\sum_{i=1}^n (y'_i)^2]^{1/2}} \quad (4.3)$$

O erro absoluto médio (MAE, Equação 3.4) é a média da diferença entre o valor previsto e o valor real em todos os casos de teste:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |Y_k - O_k| \quad (4.4)$$

onde,  $Y_k$  são os dados simulados e  $O_k$  os dados observados.

A raiz do erro quadrático médio (RMSE) é calculada através da equação 3.5,

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (Y_k - O_k)^2} \quad (4.5)$$

onde,  $Y_k$  são os dados simulados e  $O_k$  os dados observados.

Erro absoluto relativo (RAE) é o erro absoluto total relativo ao erro que teria sido se a previsão tivesse sido simplesmente a média dos valores reais.

$$RAE = \frac{|a_1 - c_1| + |a_2 - c_2| + \dots + |a_n - c_n|}{|a_1 - \bar{a}| + |a_2 - \bar{a}| + \dots + |a_n - \bar{a}|} \quad (4.6)$$

Erro quadrático relativo (RRSE) é o erro total do quadrado feito relativo ao que o erro teria sido se a previsão tivesse sido a média do valor absoluto. Como feito com o erro quadrático médio da raiz, a raiz quadrada do erro quadrado relativo é tomada para dar as mesmas dimensões que os valores previstos.

$$RRSE = \sqrt{\frac{(a_1 - c_1)^2 + (a_2 - c_2)^2 + \dots + (a_n - c_n)^2}{(a_1 - \bar{a})^2 + (a_2 - \bar{a})^2 + \dots + (a_n - \bar{a})^2}} \quad (4.7)$$

Para MAE, RSME, RAE e RRSE um valor mais baixo significa um modelo mais preciso, com um valor de 0 representando o modelo estatisticamente perfeito.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Controle de qualidade das observações

Para verificar a confiabilidade dos dados observados utilizaram-se as equações 3.1 e 3.2, para calcular o total de radiação diária esperado e o total de horas de brilho solar. Nesta análise foram utilizados os dados coletados durante o período de maio de 2014 a abril de 2015.

Na figura 4.1, está representado o total diário de radiação observado e teórico, enquanto que na figura 4.2 está representado o total de horas de brilho solar diário, para o município de Rio Grande, RS.

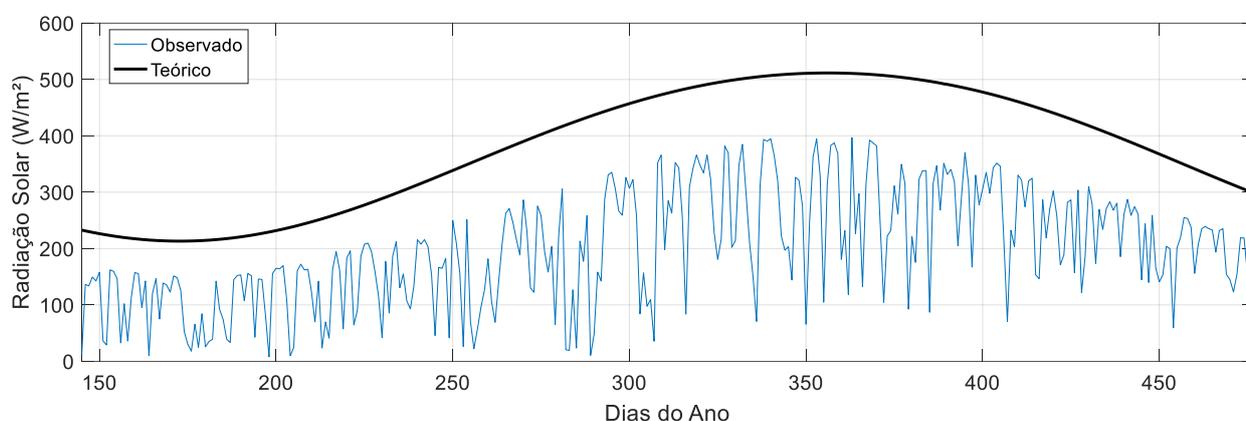


Figura 5.1 – Total de radiação diária observado, em azul, e teórico, em preto. O eixo das abscissas representa os dias do ano e no eixo das ordenadas a quantidade de radiação solar em  $W/m^2$ .

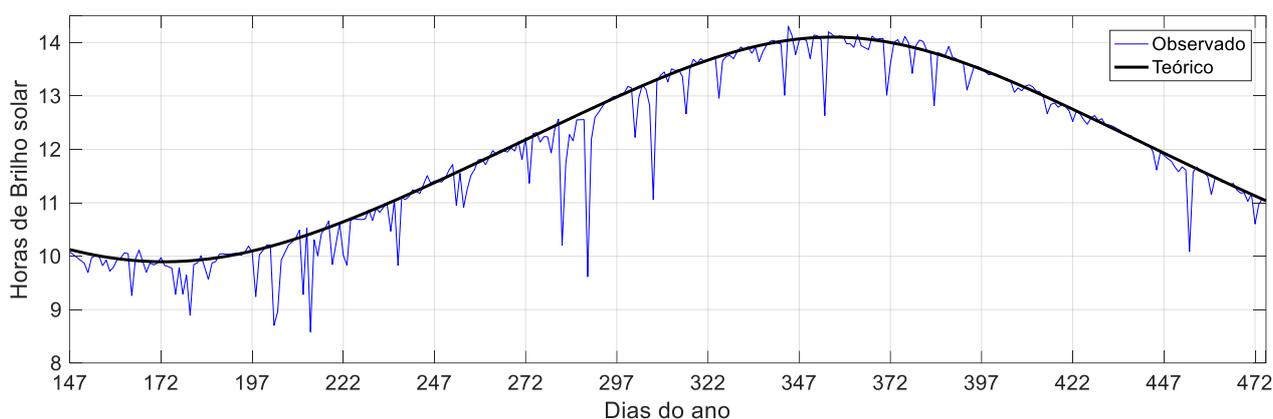


Figura 5.2 - Total de horas de brilho solar observado, em azul, em comparação ao teórico, em preto. O eixo das abscissas representa os dias do ano e no eixo das ordenadas a quantidade de horas.

Em ambas as figuras, os dados observados e teóricos estão em fase. Porém, a figura 4.1 subestima o valor teórico. Isso ocorre porque a equação utilizada não considera o caminho óptico que a radiação percorre até chegar a superfície (Figura 4.1).

Com relação ao brilho solar (Figura 4.2), há boa concordância entre os valores. Alguns dias apresentam valores maiores do que o valor teórico, isso se justifica pela equação utilizada, que considera apenas a declinação solar e a latitude do local desejado, resultando assim em valores que levam em conta a hora sideral e não a hora local.

## 5.2. Radiação Global

As figuras 4.3 e 4.4 mostram os totais de radiação solar global para o período de estudo. Há um aumento da quantidade de radiação solar que chega na superfície conforme mudam as estações do ano. Os maiores valores ocorrem no período do verão, entre dezembro e janeiro.

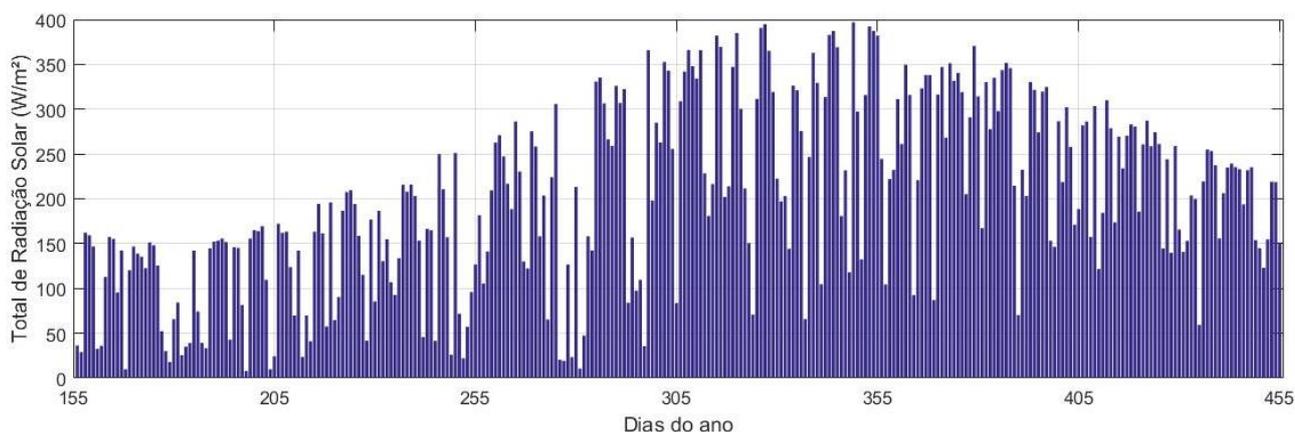


Figura 5.3 – Total diário de radiação global observada para o período de maio de 2014 a abril de 2015. O eixo das abscissas representa os dias do ano e o eixo das ordenadas os totais diários de radiação solar em  $W/m^2$ .

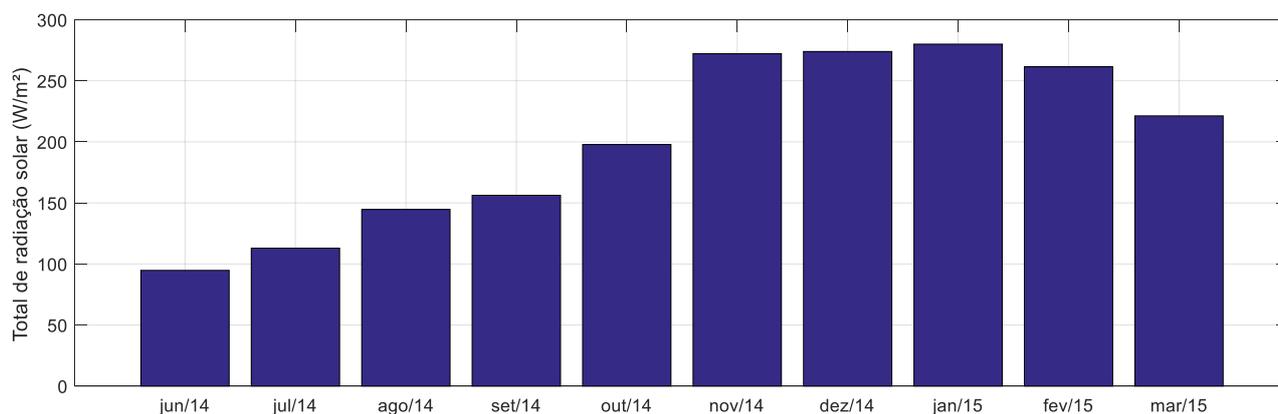


Figura 5.4 – Total mensal de radiação global observada para o período de maio de 2014 a abril de 2015. O eixo das abscissas representa os meses e o eixo das ordenadas os totais mensais de radiação solar em  $W/m^2$ .

Nas figuras 4.3 e 4.4 percebe-se coerência em relação ao esperado durante o ano, aumentando a quantidade de radiação conforme a chegada do verão, chegando aos maiores picos nos meses de dezembro e janeiro.

A presença de nuvens pode ser identificada pelas variações nas quantidades de radiação ao longo dos dias, justificando a necessidade de identificar os tipos de nuvens com maior ocorrência para auxiliar no planejamento energético.

### 5.3. Classificação da sombra de nuvens

Foi realizada uma análise de sombra de nuvem presente durante o dia no período de junho a setembro de 2014 em Rio Grande, RS. Para tanto, utilizou-se a classificação proposta Falconer (1965), já descrita na seção 3.2. Na figura 4.3, são apresentados os gráficos de radiação solar diária para os dias 17 a 22 de junho de 2014, bem como as nuvens observadas a cada dia. A análise se estendeu para os meses de julho a setembro de 2014 e estão apresentados no anexo 1.

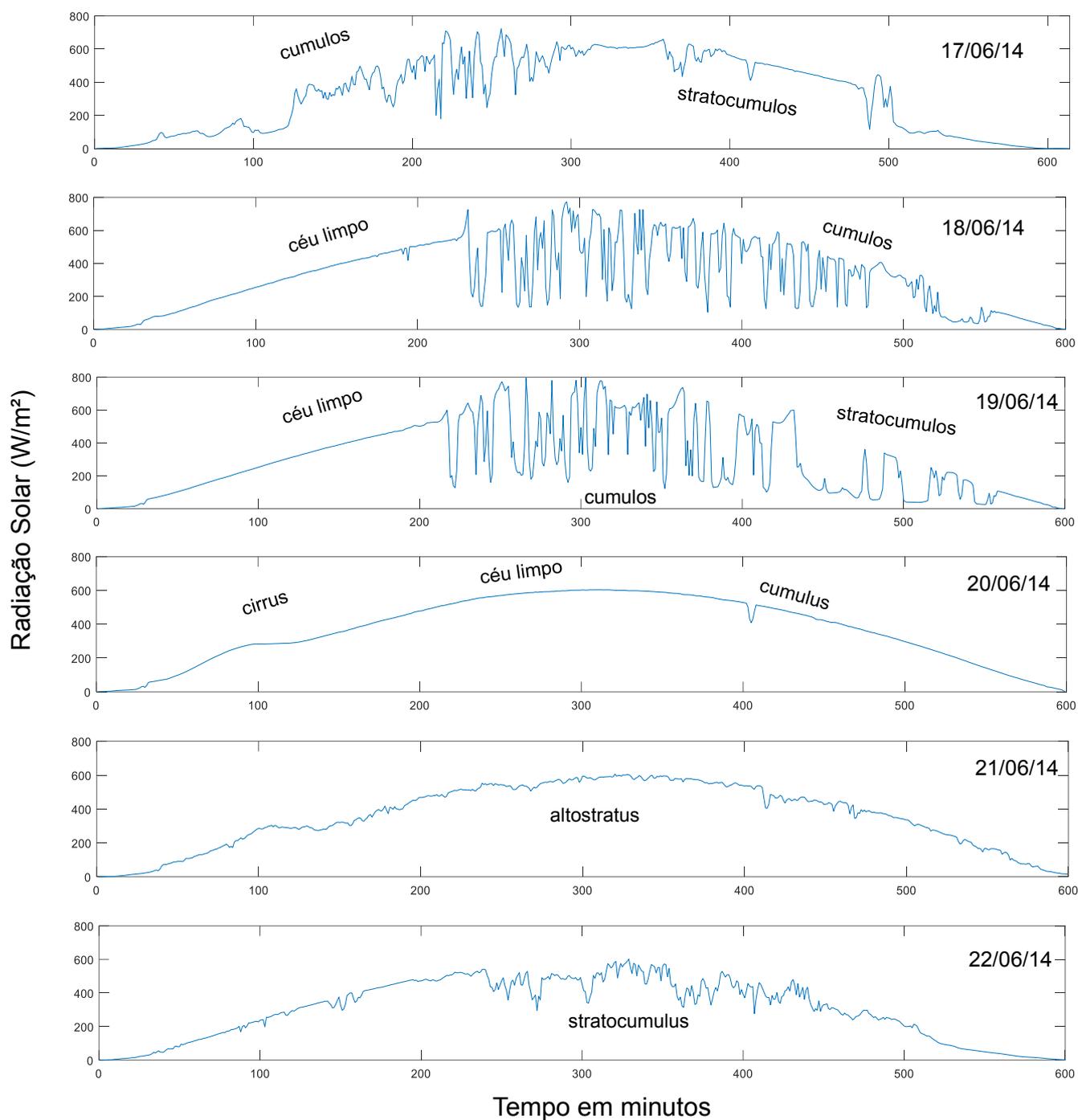


Figura 5.5 – Classificação de nuvens para os dias 17 a 22 de julho de 2014, conforme Falconer (1965)

Para a análise das nuvens foram utilizados dias onde não houve registro de chuva nos dados da estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Ficou evidente na análise uma grande incidência de nuvens baixas na região, para o período estudado, sendo principalmente nuvens tipo cúmulos e stratocumulos (Figura 4.5). Entretanto acredita-se que seja necessário dar continuidade aos estudos já feitos (Anexo

2), relacionados a classificação de nuvens, para verificar sua influência no planejamento de energia.

#### 5.4. Simulações

Para a comparação entre os dados observados e as simulações foi utilizado o mês de junho de 2014. Em ambas as simulações utilizou-se como ponto de grade a latitude e longitude correspondente a torre meteorológica. Optou-se por retirar os dias 06, 16 e 27 da análise pois esses dias apresentam falha nos dados observados, já que não possuem a quantidade total de dados de um dia, 86400 dados. Sendo assim as figuras 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 não incluem os dias citados.

Na tabela 4.1 estão apresentados os erros e a correção calculados em comparação aos dados observados e simulados para o mês de junho de 2014. A correlação entre o observado e as simulações (RegCM e WRF) é alta nos três casos, o que demonstra que os resultados estão bem relacionados entre si. Em relação às demais estatísticas é possível perceber que as simulações do RegCM apresentam os valores de erro mais baixos. A simulação realizada com o WRF apresenta os maiores valores de MAE e RMSE, o que acabou implicando em uma superestimação dos valores de radiação solar diária.

Tabela 5-1 – Correlação, erro absoluto médio (MAE), erro absoluto relativo (RAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE), raiz do erro quadrático relativo (RRSE), para a radiação solar observada em comparação com as simulações realizadas, para o mês de junho de 2014.

	Correlação	MAE(%)	ERA	RMSE(%)	RRSE
RegCM-BATS	0,91	27,64	0,25	54,10	0,43
RegCM-CLM	0,93	24,96	0,23	48,15	0,38
WRF	0,93	31,15	0,24	68,90	0,40

A figura 4.6 mostra o comparativo entre o total de radiação diária observado e o total de radiação diário feito utilizando a simulação do WRF.

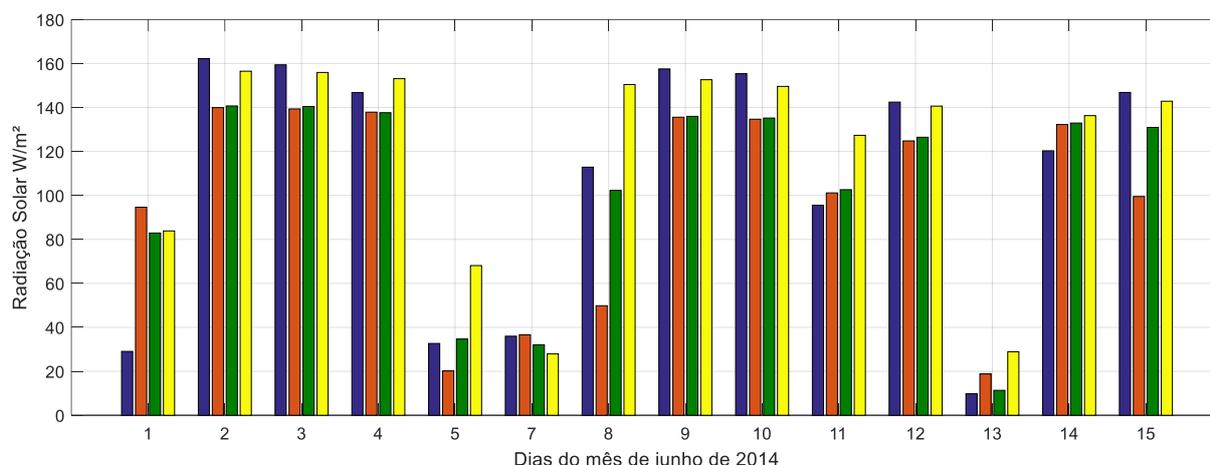


Figura 5.6 – Total de radiação diária para os dias 1 a 15 de junho. Observado, em azul, simulação RegCM-BATS, em laranja, simulação RegCM-CLM, em verde, e simulação WRF em amarelo.

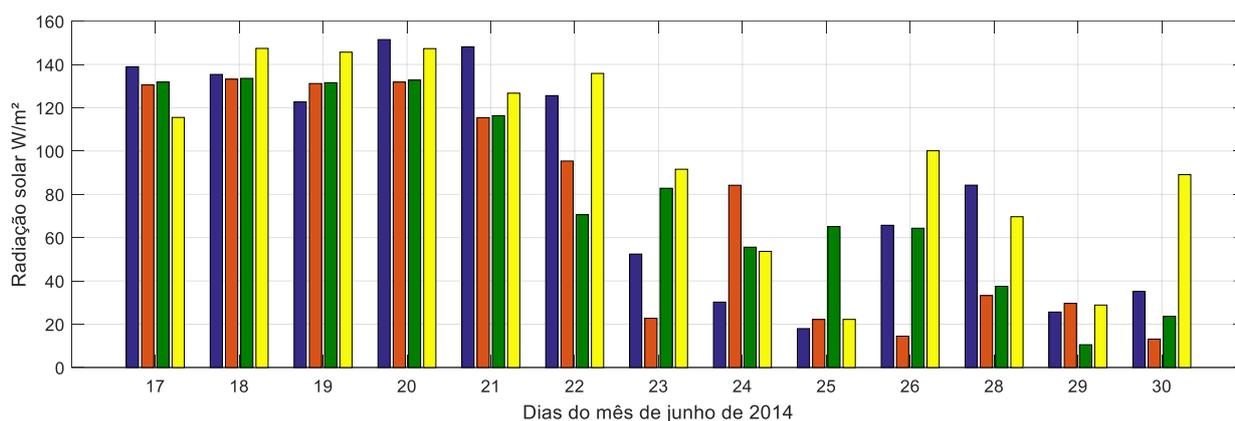


Figura 5.7 – Total de radiação diária para os dias 17 a 30 de junho de 2014. Observado, em azul, simulação RegCM-BATS, em laranja, simulação RegCM-CLM, em verde, e simulação WRF em amarelo.

As simulações possuem maiores erros na previsão em dias mais nublados. Essa dificuldade é visível nos dias 05, 13 e 25 quando o total diário observado apresenta valores baixos, as 3 simulações superestimam os valores (Figuras 4.6 e 4.7). Nos dias em que os totais são mais altos, acima de 100 W/m<sup>2</sup> as simulações tendem a apresentarem valores mais próximos do observado. Percebe-se que de maneira geral a simulação do WRF superestima os valores observados e que ambas as simulações do RegCM tentam a apresentar valores menores do que o observado.

A figura 4.8 mostra a comparação entre os dados observados e a simulação feita utilizando o WRF, onde os dados estão concatenados em médias horárias. Através desse gráfico é possível perceber que quanto mais baixos os valores de radiação mais a

simulação superestima os valores. E quanto mais alto mais próximos do observado os dados estão.

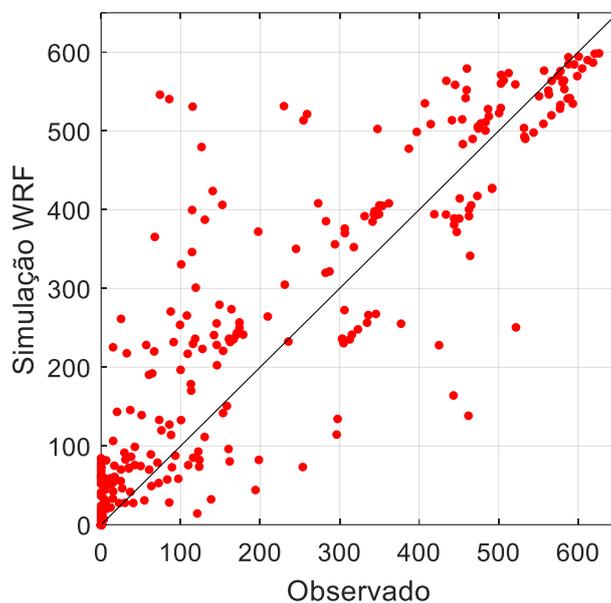


Figura 5.8 – Comparação entre dados observados, no eixo da abscissa, e simulação utilizando o WRF, do eixo das ordenadas. Os dados são de radiação solar em  $W/m^2$ .

A figura 4.9 mostra a comparação entre os dados observados e as simulações do RegCM, onde os dados estão concatenados em médias de 6 em 6 horas. Percebe-se que na maior parte do tempo as simulações apresentam valores mais baixos. Embora exista uma tendência a superestimar os valores quando a quantidade de radiação é mais baixa.

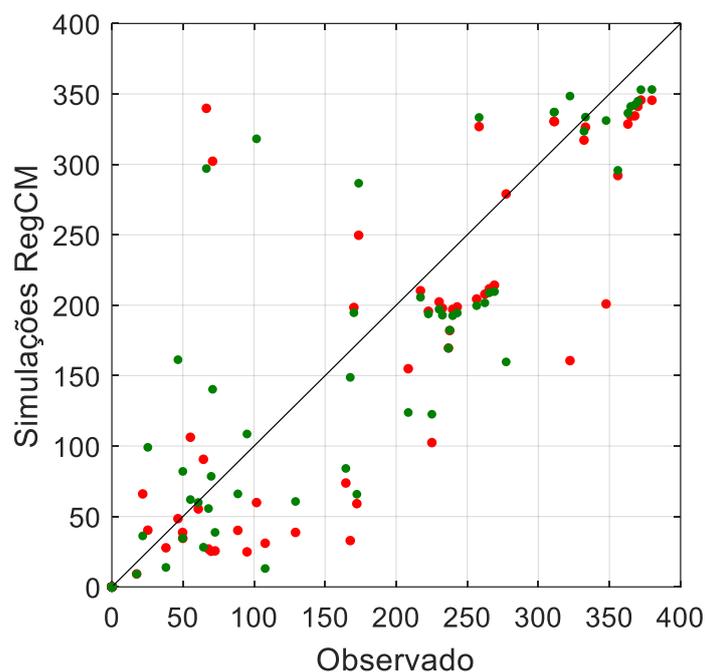


Figura 5.9 – Comparação entre dados observados, no eixo da abscissa, as simulações do RegCM, do eixo das ordenadas. A simulação RegCM-BATS em comparação com o observado está em vermelho e a simulação RegCM-CLM em comparação com o observado está em verde. Os dados são de radiação solar em  $W/m^2$ .

Também foi realizada uma análise mais expandida, incluindo o período de junho de 2014 a março de 2015, e as simulações do RegCM para o mesmo período. A tabela 4.2 mostra os erros calculados para os totais mensais. Novamente a correlação entre os dados é alta e utilizando um período maior de dados houve uma diminuição nas demais estatísticas.

Tabela 5-2 – Correlação, erro absoluto médio (MAE), erro absoluto relativo (RAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE), raiz do erro quadrático relativo (RRSE), para a radiação solar observada em comparação com as simulações realizadas, para o período de junho de 2014 a março de 2015, em totais mensal.

	Correlação	MAE	RAE	RMSE	RRSE
RegCM-BATS	0,98	16,80	0,28	21,09	0,31
RegCM-CLM	0,99	11,34	0,19	13,13	0,20

A figura 4.10 mostra a comparação entre os totais mensais observados e os simulados pelo RegCM. Já a figura 4.11 mostra a comparação entre os totais sazonais observados e simulados, JAS – julho/agosto/setembro. OND – outubro/novembro/dezembro. JFM – janeiro/fevereiro/março.

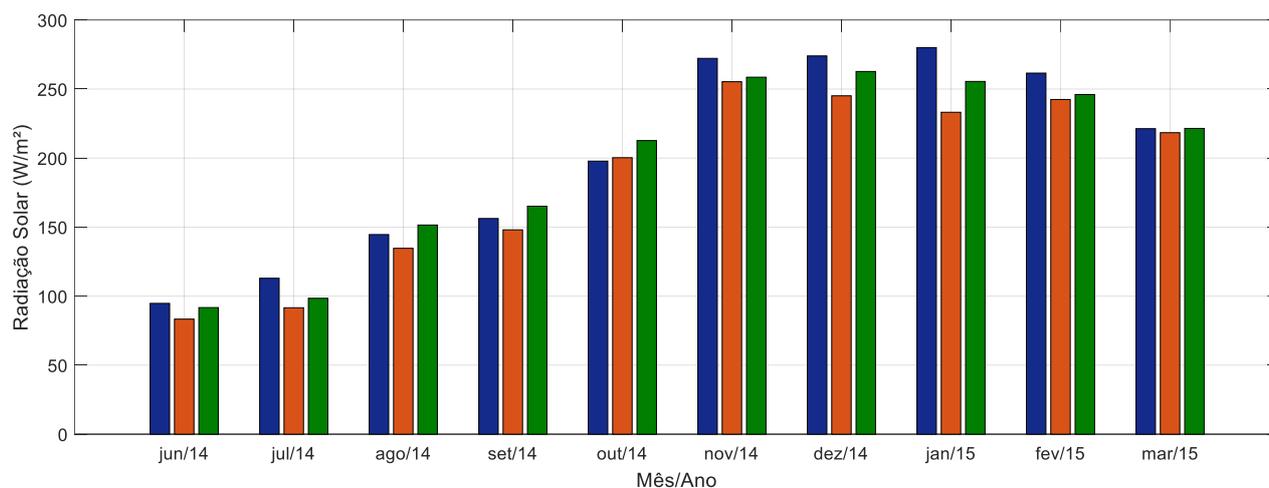


Figura 5.10 – Comparação dos totais mensais entre dados observados e simulações para o período de junho de 2014 a março de 2015. Observado, em azul, simulação RegCM-BATS, em laranja e simulação RegCM-CLM, em verde.

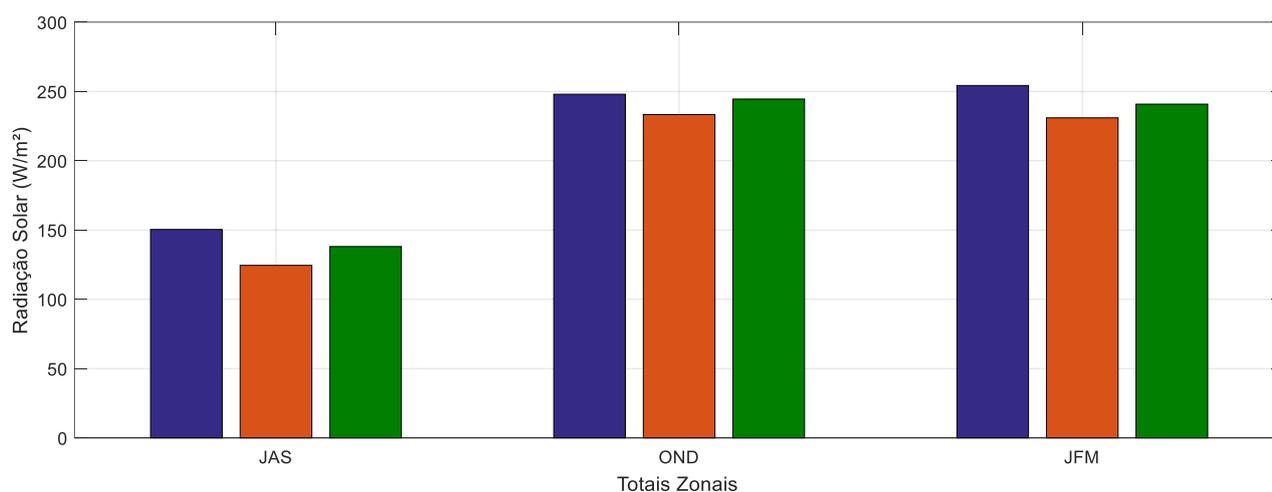


Figura 5.11 – Totais sazonais entre os dados observados e as simulações do RegCM. Observado, em azul, simulação RegCM-BATS, em laranja, simulação RegCM-CLM, em verde.

Novamente é possível perceber que as simulações do RegCM apresentam valores próximos ao observado, apresentando na maioria das vezes valores menores. Com base nas análises feitas é possível perceber que a simulação RegCM-CLM, apresenta valores mais próximos ao observado e valores de erros menores.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise de confiabilidade feita utilizando as equações mostra uma proximidade entre as horas de brilho solar esperado e o observado. A diferença entre a quantidade observada e a teórica pode ser justificada pela incidência de nuvens, tendo em vista que a equação não as considera. As médias de radiação solar são coerentes em relação ao esperado durante o ano, aumentando a quantidade de radiação conforme a chegada do verão, chegando aos maiores picos nos meses de dezembro e janeiro.

Através da classificação das sombras de nuvens realizada, foi possível perceber uma grande frequência de nuvens baixas durante o dia no período estudado. Entretanto não foi possível desenvolver, até o presente momento, um método mais objetivo de identificar as sombras de nuvens, que auxiliaria na melhor caracterização da região estudada.

A simulação do WRF apresenta um erro absoluto médio de 31,15% e uma raiz do erro quadrático relativo de 68,90%. O que implica no total de radiação diária ser superestimado pelo WRF em quase todos os dias. A diferença é ainda maior em relação aos dias onde o total de radiação observada é baixo, como por exemplo nos dias 5, 13 e 25.

As simulações do RegCM, apresentam na maior parte dos dias um total de radiação diária menor do que o observado e ambas têm valores de erro médio absoluto entre 25 e 28%. As simulações RegCM-BATS E RegCM-CLM conseguem se aproximar mais do observado nos dias onde a incidência de radiação foi menor.

Através dessas análises é possível perceber que ambos os modelos têm dificuldades em simular dias com grande incidência de nuvens, onde a quantidade de radiação solar é mais baixa.

Na comparação para o período de junho de 2014 a março de 2015, com as simulações do RegCM e os dados observados, é possível evidenciar que a simulação RegCM-CLM é uma opção mais viável no planejamento energético. A simulação RegCM-CLM apresenta os valores mais baixos de MAE e RMSE, 11,34% e 16,80% respectivamente, enquanto a simulação RegCM-BATS apresenta os valores de MAE de 16,80 e RMSE de 21,09.

Tendo em vista o planejamento para geração de energia solar, acredita-se que o modelo climático RegCM seja uma opção mais viável. O modelo apresenta totais de

radiação mais parecidos com o observado e erros médios menores, o que é importante na previsão da energia que será gerada.

Como continuidade para esta pesquisa seria necessário ampliar o período de estudo, realizando as simulações para períodos maiores e implementar o planejamento energético a partir do modelo escolhido.

## 7. REFERÊNCIAS

AHRENS, D. C. **Meteorology today**. 6th. ed. Pacific Grove [u.a.]: Brooks/Cole Pub., 2000.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/2005\\_AtlasEnergiaEletricaBrasil2ed/06b7ec52-e2de-48e7-f8be-1a39c785fc8b](http://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/2005_AtlasEnergiaEletricaBrasil2ed/06b7ec52-e2de-48e7-f8be-1a39c785fc8b)>.

BANKS, R. F. et al. Sensitivity of boundary-layer variables to PBL schemes in the WRF model based on surface meteorological observations , lidar , and radiosondes during the HygrA-CD campaign. **Atmospheric Research**, v. 176–177, p. 185–201, 2016.

BRASIL. **Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa)**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/programas/proinfa>>. Acesso em: 19 dez. 2018.

COLLINS, W. D. et al. The Community Climate System Model Version 3 ( CCSM3 ). **JOURNAL OF CLIMATE**, v. 19, p. 2122–2143, 2006.

DICKINSON, R. E. et al. **Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme ( BATS ) for the NCAR Community Climate Model**. Boulder: NCAR/TN-275+STR NCAR TECHNICAL NOTE, 1986.

FALCONER, R. A Simple Method for Obtaining a Continuous Record of the Presence and Type of Clouds in the Sky During the Day. **Pure and Applied Geophysics**, v. 60, p. 236–244, 1965.

HOKE, J. E.; ANTHES, R. A. The initialization of numerical models by a dynamic-initialization technique. **Monthly Weather Review**, v. 104, p. 1551–1556, 1976.

HONG, S.; NOH, Y.; DUDHIA, J. A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of. **Monthly Weather Review**, v. 134, p. 2318–2341, 2006.

HOU, Y.-T.; MOORTHI, S.; CAMPANA, K. Parameterization of Solar Radiation Transfer in the NCEP models. **NCEP Office Note 441**, 2002.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Toronto, Canada: Academic Press, 1983.

KIVALOV, S. N.; FITZJARRALD, D. R. Quantifying and Modelling the Effect of Cloud Shadows on the Surface Irradiance at Tropical and Midlatitude Forests. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 166, n. 2, p. 165–198, 2018.

LIOU, K.-N. **An introduction to atmospheric radiation**. San Diego, Califórnia, USA: Academic Press INC, 1980.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2014.

PORRINI, C. et al. Evaluación del desempeño de la versión actualizada del WRF para el

pronóstico de energia solar. **Solar Energy**, v. 86, n. 11, p. 3205–3215, 2012.

PORRINI, C.; BOEZIO, C. SOLAR IRRADIATION FORECASTING USING WRF REGIONAL MODEL: A CASE OF STUDY IN URUGUAY. **Anais do X Workshop de micrometeorologia**, p. 6–10, 2017.

SKAMAROCK, W. C. et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. **NCAR TECHNICAL NOTE**, n. July 2014, 2008.

STAUFFER, D. R.; SEAMAN, N. L. Use of Four-Dimensional Data Assimilation in a Limited-Area Mesoscale Model. Part I: Experiments with Synoptic-Scale Data. **Monthly Weather Review**, v. 118, p. 1250–1277, 1989.

STRAHLER, A. **Introducing Physical Geography**. 5. ed. Chichester, UK: John Wiley and Sons Ltd, 2010.

TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A Practical Guide to Wavelet Analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, p. 61–78, 1998.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric science, an introductory survey**. 2nd. ed. Amsterdam: Elsevier Ltd, 2006.

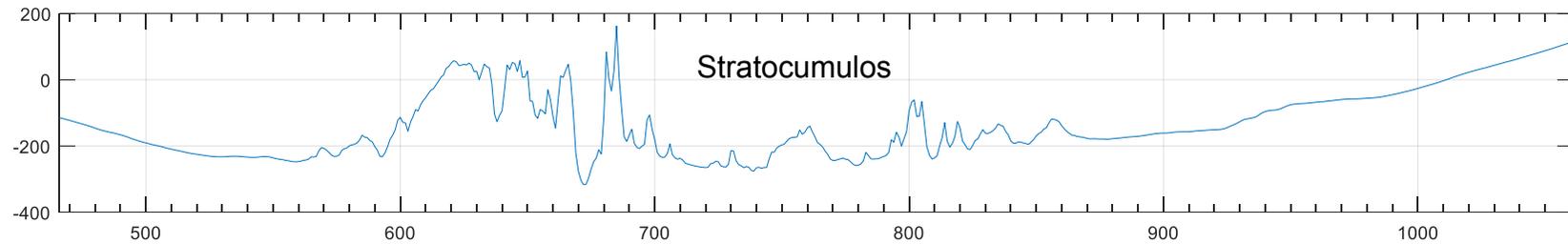
WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. 2. ed. London, UK: Academic Press, 2006.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION'S (WMO). **International Cloud Atlas**. Disponível em: <<https://cloudatlas.wmo.int/home.html>>. Acesso em: 10 jun. 2018.

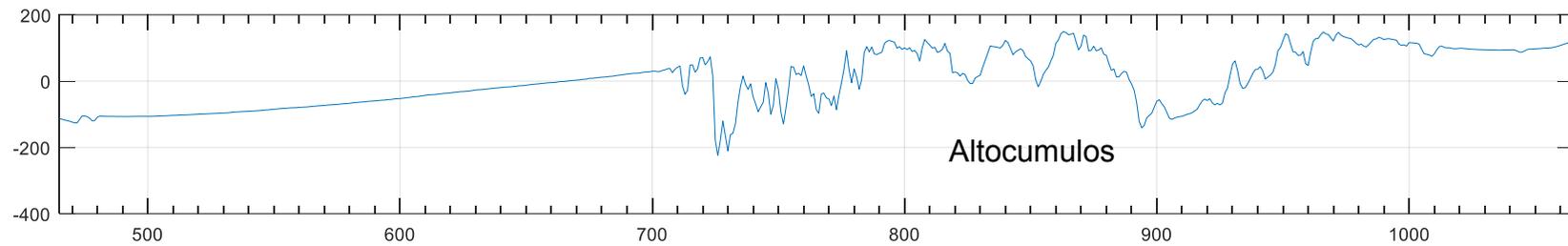
YNOUE, R. Y. et al. **Meteorologia: noções básicas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

## ANEXO 1 – Classificação de sombra de nuvem

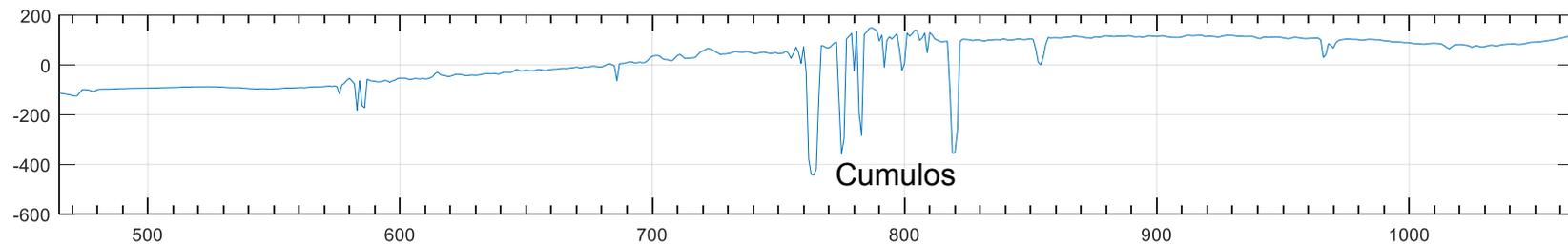
Dia 26/06/2014



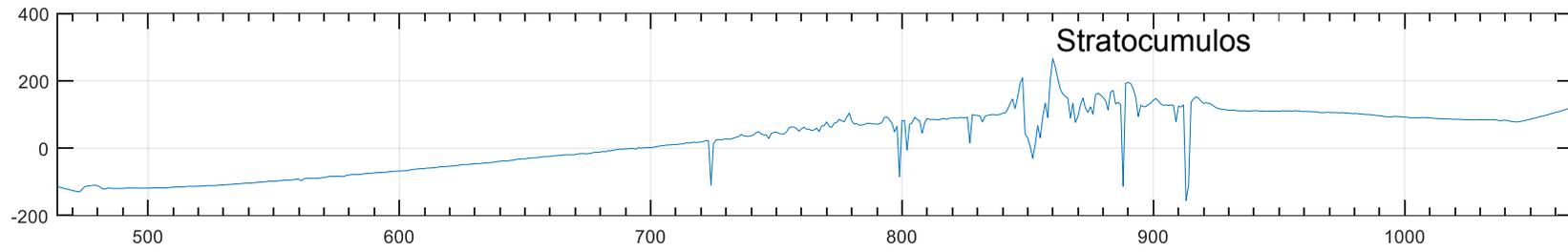
Dia 07/07/2014



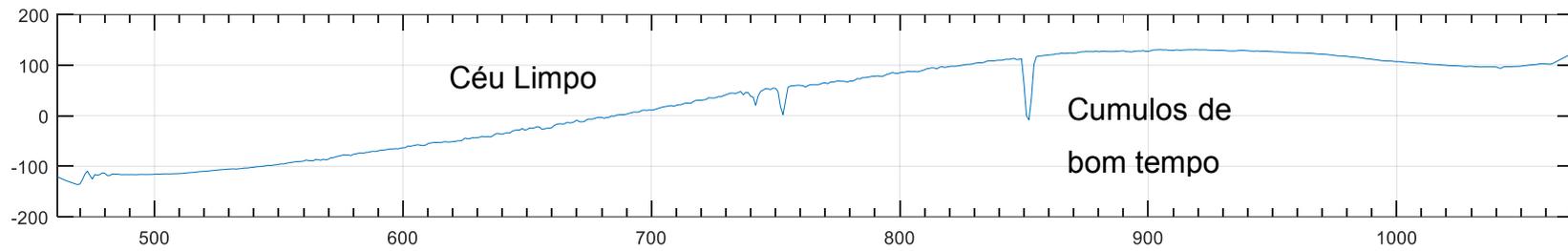
Dia 08/07/2014



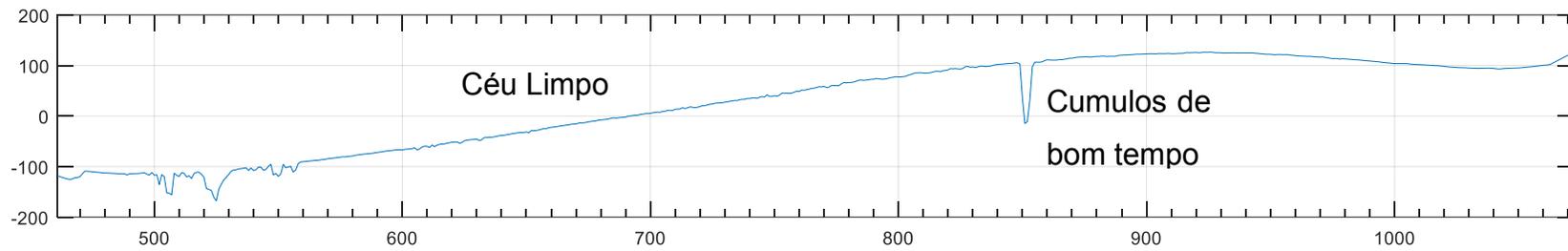
Dia 11/07/2014



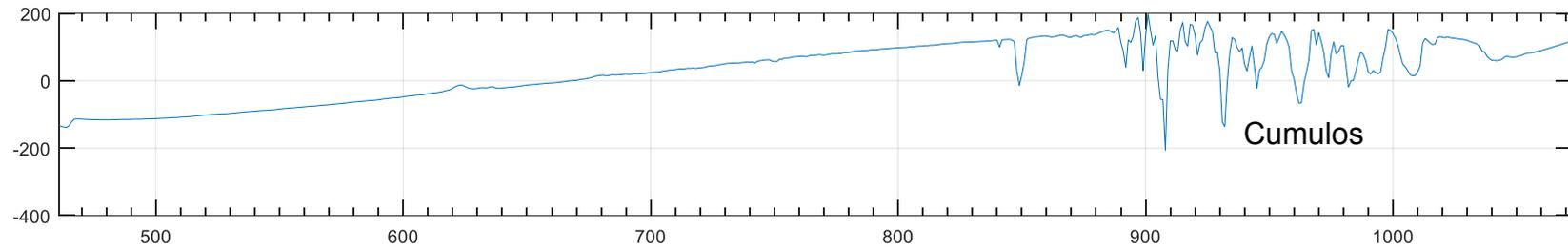
Dia 19/07/2014



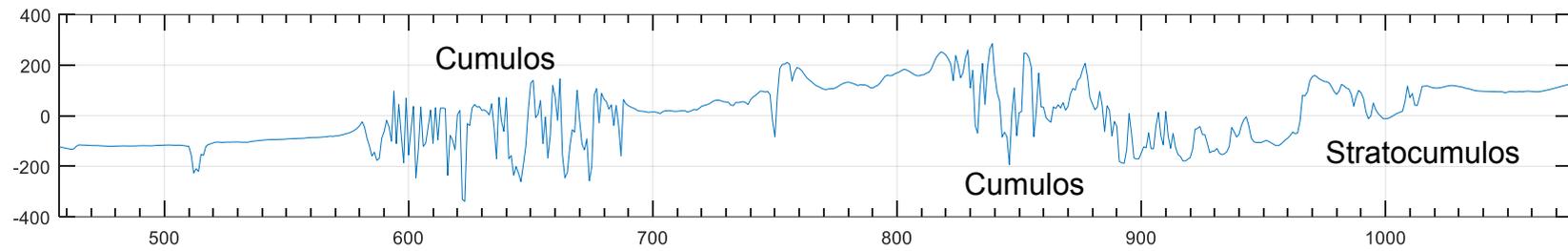
Dia 20/07/2014



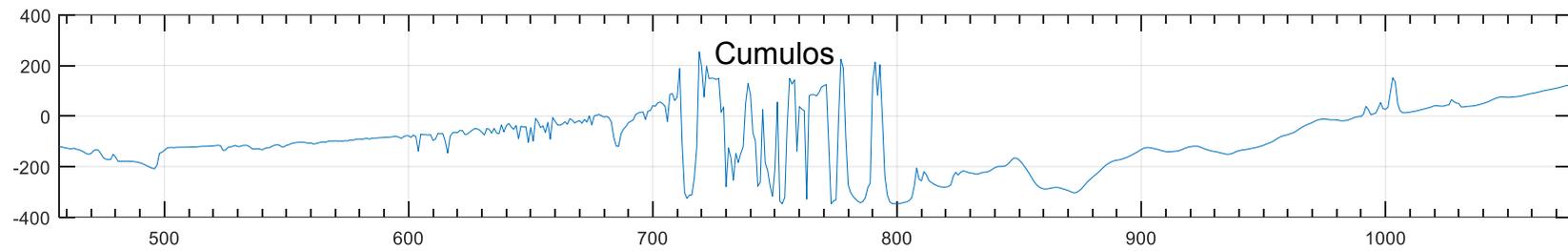
Dia 26/07/2014



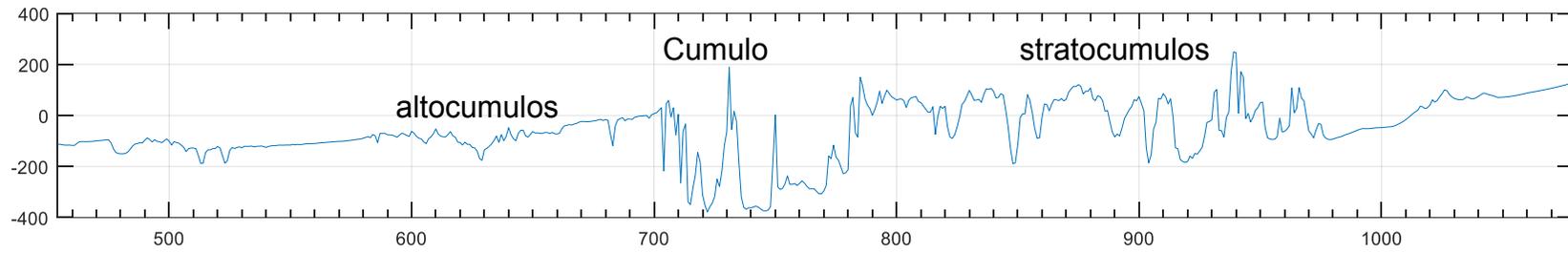
Dia 27/07/2014



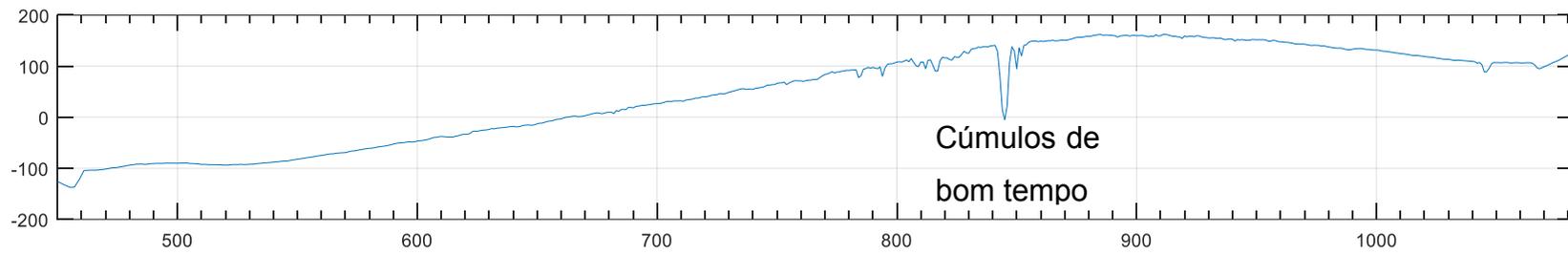
Dia 29/07/2014



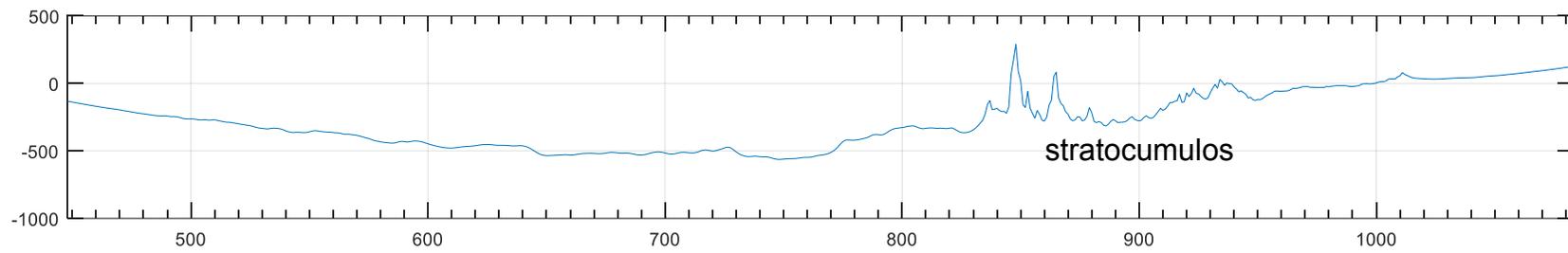
Dia 31/07/2014



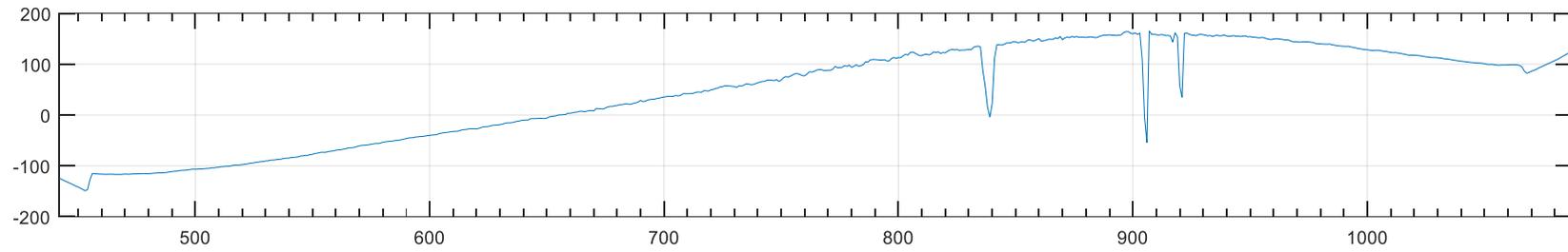
Dia 06/08/2014



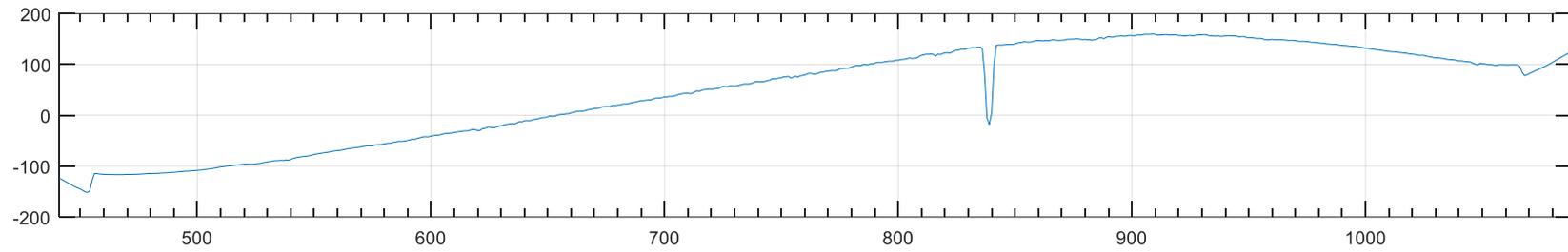
Dia 07/08/2014



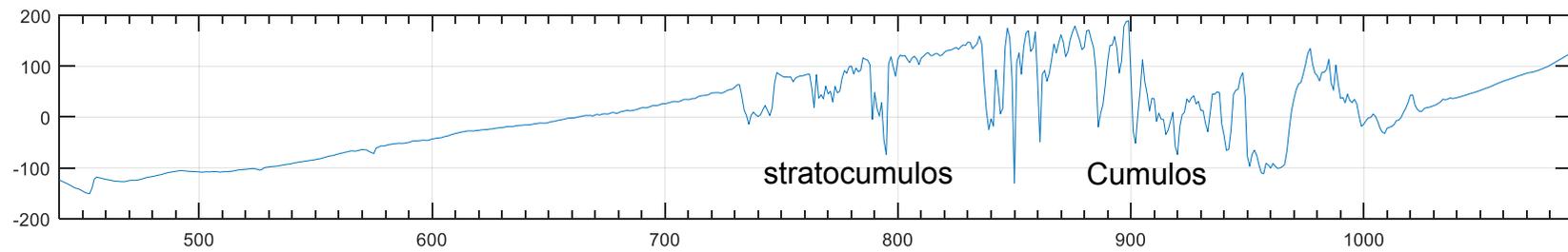
Dia 13/08/2014



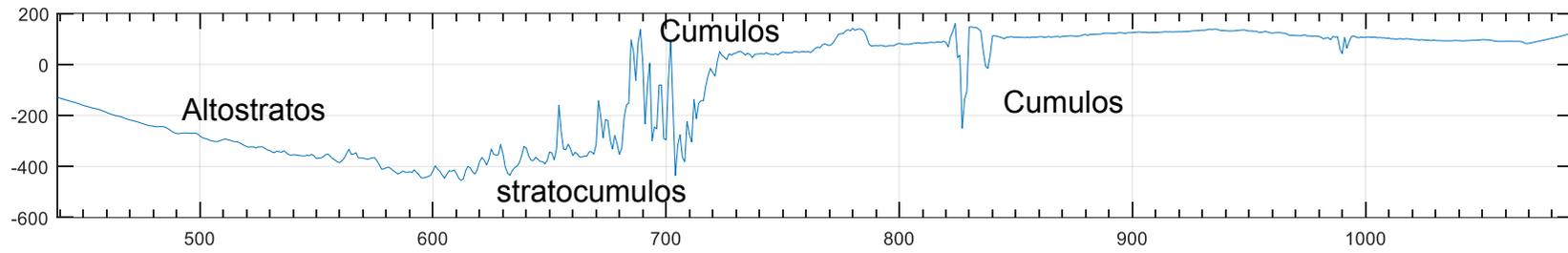
Dia 14/08/2014



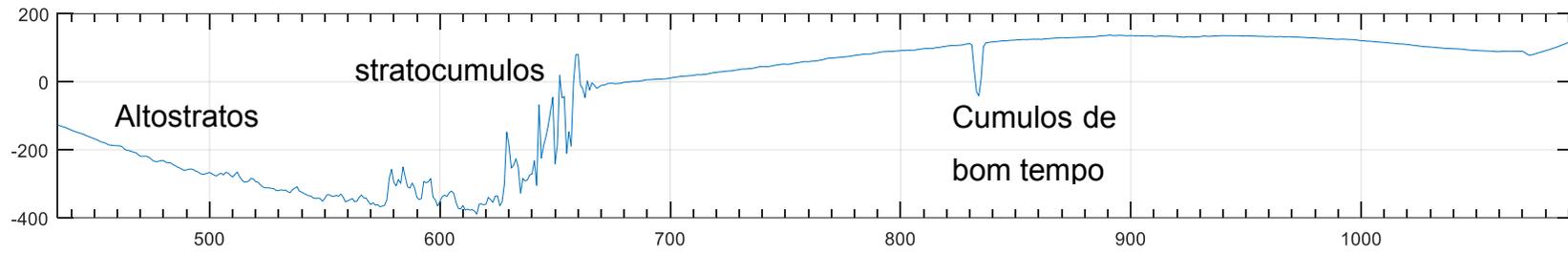
Dia 15/08/2014



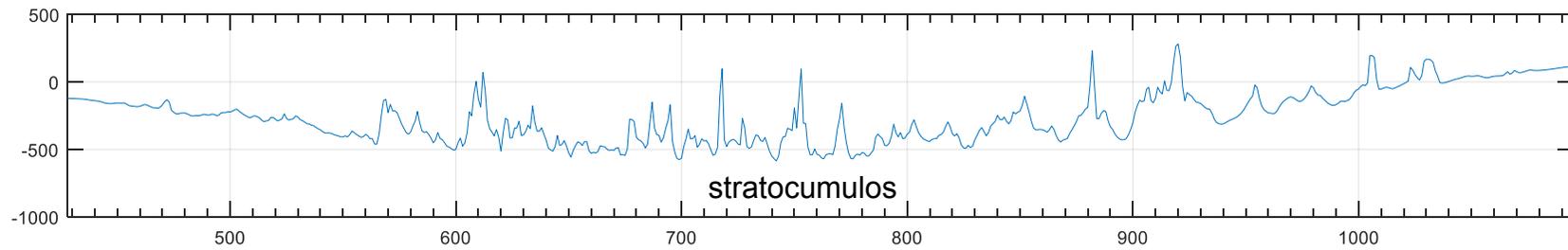
Dia 16/08/2014



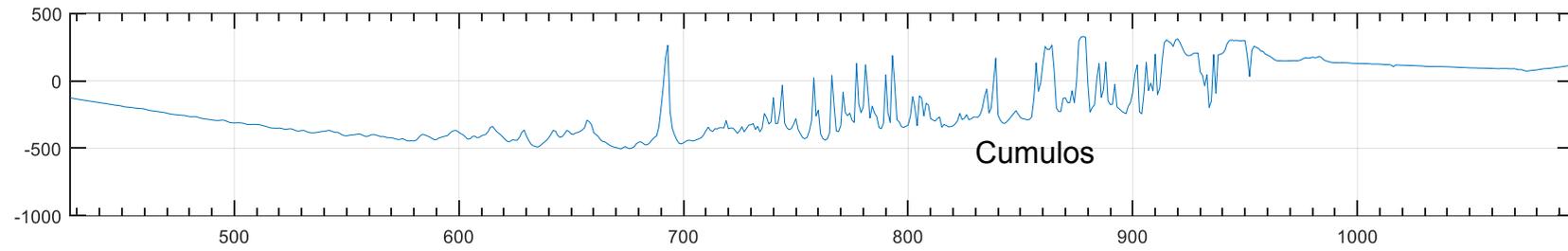
Dia 21/08/2014



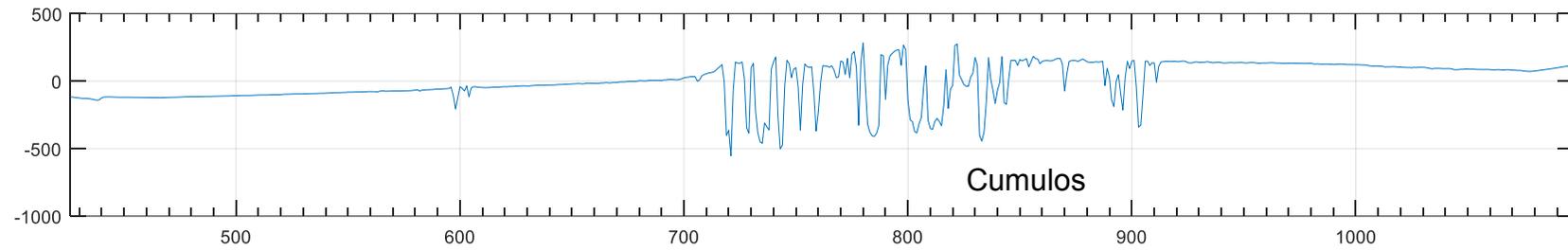
Dia 26/08/2014



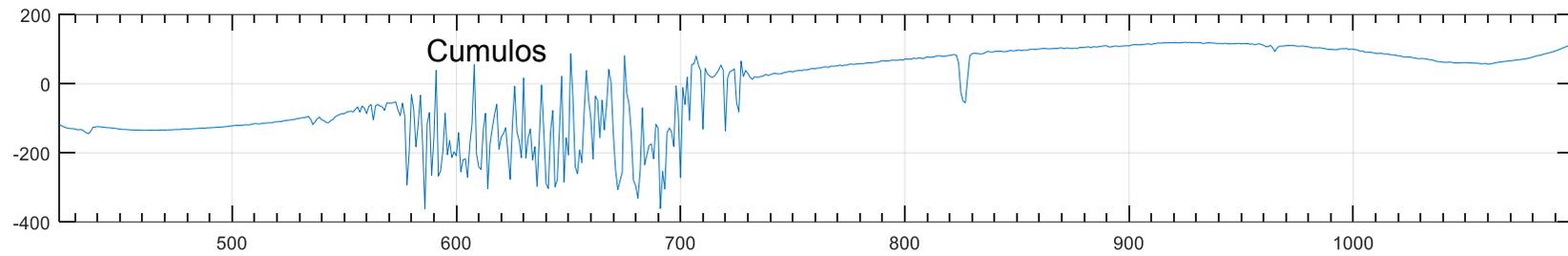
Dia 27/08/2014



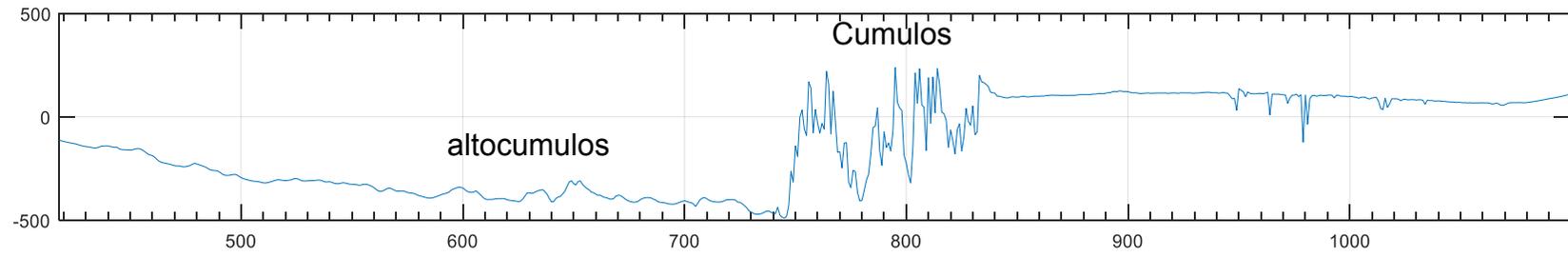
Dia 28/08/2014



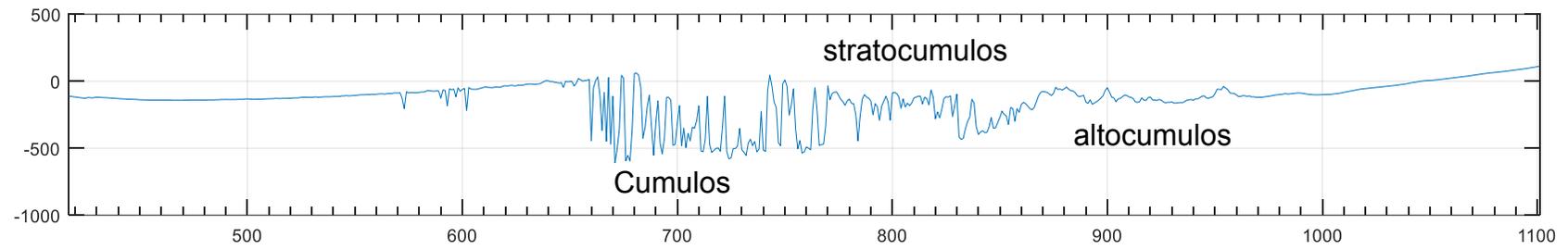
Dia 30/08/2014



Dia 03/09/2014



Dia 04/09/2014



## ANEXO 2 – Trabalhos sobre classificação de sombra de nuvem

Publicado nos anais da 8ª Conferência sul em modelagem computacional 2018.



### ANÁLISE DO TIPO DE NUVEM PRESENTE DURANTE O DIA PARA O PERÍODO DE 17 A 22 DE JUNHO DE 2014 NO MUNICÍPIO DE RIO GRANDE/RS

Karina Schiavo Seide<sup>1</sup>  
Nisia Krusche<sup>2</sup>

**Resumo:** As nuvens tem grande influência na quantidade de radiação que chega ao solo. Identificar os tipos de nuvem presente em determinada região ajuda na previsão da radiação total diária. Alguns modelos de simulação da atmosfera superestimam os valores radiação solar diária, por não representarem as nuvens baixas adequadamente. Nesse sentido, esse estudo busca desenvolver um método para facilitar a identificação do tipo de nuvem presente durante o dia através da transformada de wavelet. Para isso, foram utilizados dados de radiação solar, coletados na Universidade Federal do Rio Grande, durante o período de 17 a 22 de junho de 2014, a uma frequência de 1Hz. Inicialmente foram identificados os tipos de nuvem presente durante o dia nesse período. Através dessa identificação foi possível perceber que as nuvens baixas têm maior predomínio nesse período. Com o objetivo de encontrar um método objetivo na identificação das nuvens, para grande quantidade de dados, foi utilizada a transformada de wavelet. Através das análises foi possível perceber que a transformada de wavelet permite identificar adequadamente as nuvens do tipo cumulus, apresentando um sinal bem expressivo para esse tipo de nuvem. Entretanto, é necessário realizar mais estudos para verificar os sinais para outras nuvens.

**Palavras-chave:** Classificação de nuvens. Radiação Solar. Transformada de Wavelet.

---

<sup>1</sup> Mestranda em Modelagem Computacional, Universidade Federal do Rio Grande, karinaseide@furg.br

<sup>2</sup> Doutora em Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande, nkrusche@furg.br.

# 1 Introdução

A radiação solar é a principal fonte de energia da Terra e tem um grande potencial na geração de energia, representando uma alternativa as formas convencionais utilizadas atualmente e uma opção viável e sustentável para esse fim. Sendo assim, é importante entender os fatores que influenciam na quantidade de radiação que chega ao solo.

As nuvens, por passarem pelos processos de absorção e espalhamento, interferem no total de radiação que chega a superfície. As nuvens podem ser encontradas em diferentes altitudes, variando do nível do mar ao topo da troposfera. De acordo com a classificação da Organização Mundial de Meteorologia (World Meteorological Organization, 2017) existem 10 tipos básicos de nuvens. Cirrus, cirrocumulus, cirrostratus aparecem com mais frequência no nível alto. Altocumulus, altostratus, nimbostratus surgem no nível médio. Stratus, stratocumulus, cumulus no nível baixo. E cumulonimbus com formação no nível baixo e com grande desenvolvimento vertical.

Levando em consideração a influência que as nuvens têm na radiação solar, identificar as nuvens mais frequentes em determinada região é importante na previsão da radiação solar diária. Porrini e Boezio (2017a) apresentam em seu estudo que as simulações numéricas superestimam os valores de radiação solar diária, principalmente devido à dificuldade relacionadas a previsão de nuvens baixas, utilizando o modelo regional WRF. Isso justifica a necessidade de entender melhor as nuvens presentes em determinada região.

Falconer (1965) desenvolveu um método de análise do tipo de nuvem presente no dia a partir de um aparelho simples que capta a sombra formada pela nuvem em um gráfico. É possível aplicar esse método utilizando dados de radiação solar, entretanto o método é trabalhoso, tendo em vista que grande parte do processo é feito de forma comparativa e visual.

Nesse sentido, o objetivo desse estudo é desenvolver um método mais objetivo na identificação de nuvens utilizando os preceitos de Falconer (1965) e a transformada de wavelet.

### 3 Materiais e Métodos

Para este estudo foram utilizados dados de radiação solar que são obtidos através de um piranômetro, modelo 11696, série CMP3, da marca Campbell Scientific e de um radiômetro, modelo NR-LITE, marca Kipp&Zonen (Fig. 1), a uma frequência de 1Hz. Os aparelhos estão instalados a 6 metros de altura.

Para a análise das nuvens, os dados foram agrupados em médias de minuto e as nuvens foram classificadas de forma visual, por comparação levando em consideração o que é apresentado por Falconer (1965).

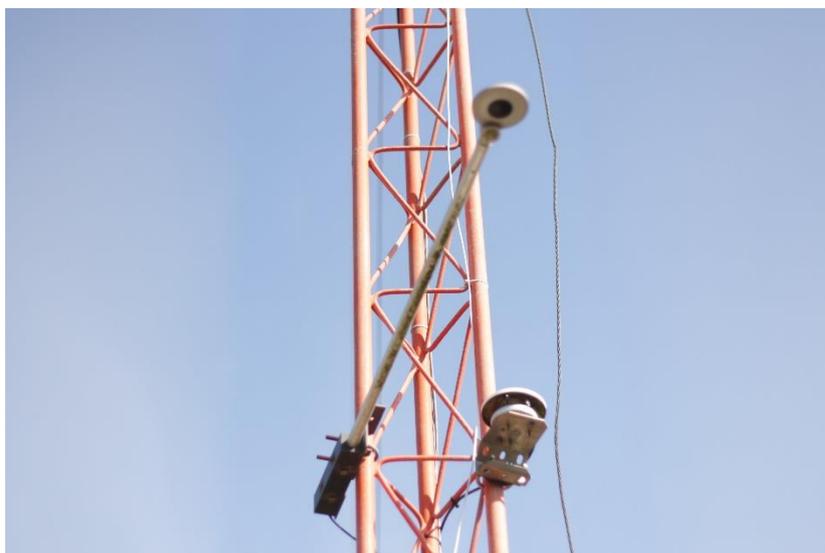


Figura 1: Equipamentos de medição utilizados, a esquerda radiômetro e a direita o piranômetro.

Falconer (1965) desenvolveu um método para identificar os tipos de nuvens a partir de um dispositivo que captava a luz solar. Em seus estudos percebeu que o traçado mudava conforme uma nuvem passava pelo aparelho, e assim conseguiu identificar padrões para realizar uma boa estimativa das nuvens presente no dia. No artigo o autor apresenta detalhadamente como realizar a interpretação dos traçados e padrões referentes a cada tipo de nuvem. Ele apresenta uma breve descrição do padrão de traçado para cada tipo de nuvem identificada, e ainda apresenta exemplos como mostra a Fig. 2.

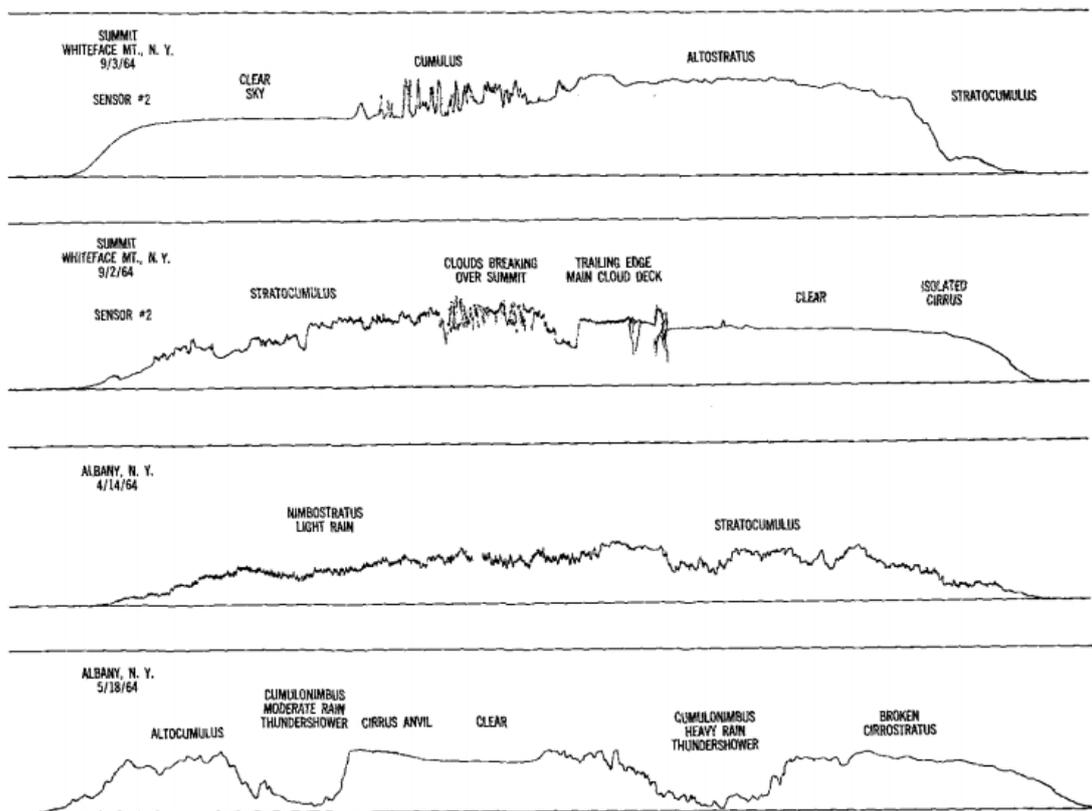


Figura 2: Traços de registro típicos que ilustram as variações na luz refletida de diferentes tipos de nuvens. Fonte: Falconer, 1965.

Falconer (1965) apresenta treze descrições de traçados. Descreve que o céu limpo é identificado por um traço constante e suave, cumulos apresentam desvios agudos e frequentes, stratocumulos apresentam um traço irregular e alto, altostratus com um traçado com poucas deflexões, autocumulos apresenta deflexões pequenas a moderadas e cirrus apresentam pequenas deflexões suaves e arredondadas. Essas informações foram utilizadas para a identificação das nuvens no período desse estudo.

Buscando desenvolver um método para identificar nuvens em grande escala de dados utilizou-se da transformada de wavelet. A transformada de wavelet é o aprimoramento da transformada de furrier por janela (Torrence e Compo, 1998).

A análise Wavelet representa uma técnica de janelamento de regiões de tamanho variável. A análise Wavelet permite o uso de longos intervalos de tempo onde se busca informações de baixa frequência mais precisas e regiões mais curtas onde se busca informações de alta frequência.

## 4 Resultados

Inicialmente foi realizada uma análise do tipo de nuvem presente durante o dia no município de Rio Grande, analisando os dados de radiação solar para os dias 17 a 22 de junho de 2014. A análise foi feita utilizando o método identificação proposto por Falconer (1965). Essa análise inicial buscava encontrar os principais tipos de nuvens presentes durante o dia no período. A Fig. 3, mostra a classificação das nuvens para os dias estudados. É possível perceber que existe uma grande incidência de nuvens do tipo cúmulos e do tipo stratocumulos, no período estudado.

Esse processo de identificação é feito de forma visual e comparativa, portanto sua utilização em ampla escala torna-se trabalhosa. Tendo como objetivo facilitar essa identificação iniciou-se as análises utilizando a transformada de wavelet. O método da transformada de wavelet foi utilizado nos seis dias do período, e foi encontrado o máximo da variância de wavelet para cada dia e o tipo de nuvem associada, conforme Tab.1.

Tabela 1: Máximo da variância de Wavelet encontrado para os dados de radiação dos dias 17 a 22 de junho de 2014, onde a coluna 1 representa os dias, a coluna 2 o máximo da variância para os dados de radiação solar utilizados e a coluna 3 o tipo de nuvem conforme o método de Falconer (1965).

Dias	Máximo da variância de wavelet	Tipo de Nuvem
17 de junho	9.15 a 16.94 minutos	Maior parte é cúmulos
18 de junho	6 a 12 minutos	Cúmulos
19 de junho	7 a 8 minutos e 18 a 24 minutos	Cúmulos
20 de junho	0	Céu limpo
21 de junho	111 a 146 minutos	Altostratus
22 de junho	48 a 55 minutos e 84 a 127 minutos	Stratocumulos

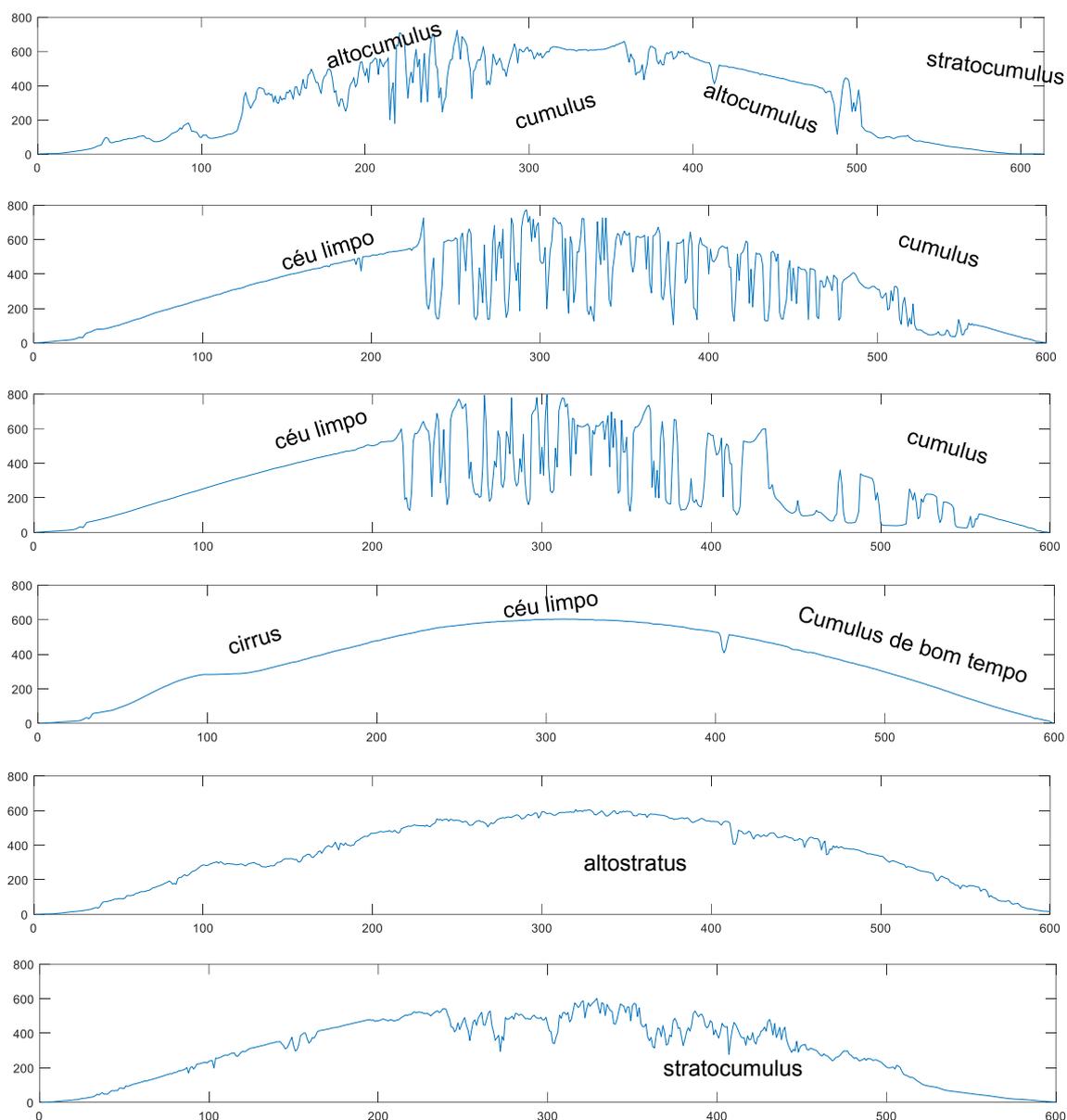


Figura 3: Classificação de nuvens utilizando os preceitos de falconer, onde o eixo x representa o tempo em minutos e o eixo y a radiação solar em  $w/m^2$ . a) dia 17 de junho de 2014, onde foi encontrado nuvens altocumulos, cúmulos e stratocumulos. b) dia 18 de junho de 2014, representação de céu limpo e nuvens cúmulos. c) dia 19 de junho de 2014, representação de céu limpo e nuvens cúmulos. d) dia 20 de junho de 2014, representação de nuvens cirrus e cúmulos de bom tempo e céu limpo. e) dia 21 de junho de 2014, representação de nuvens altostratus. f) dia 22 de junho de 2014, representação de nuvens stratocumulos.

Para representar graficamente os resultados foi escolhido o dia 17 de junho de 2014. Na Fig. 4.a, estão classificadas as nuvens para o dia conforme Falconer (1965). É possível perceber que na maior parte do tempo existem nuvens baixas. Na Fig. 4.b, está representada a parte real dos sinais da

transformada para o período de maior variância de wavelet, sendo neste caso 9 minutos.

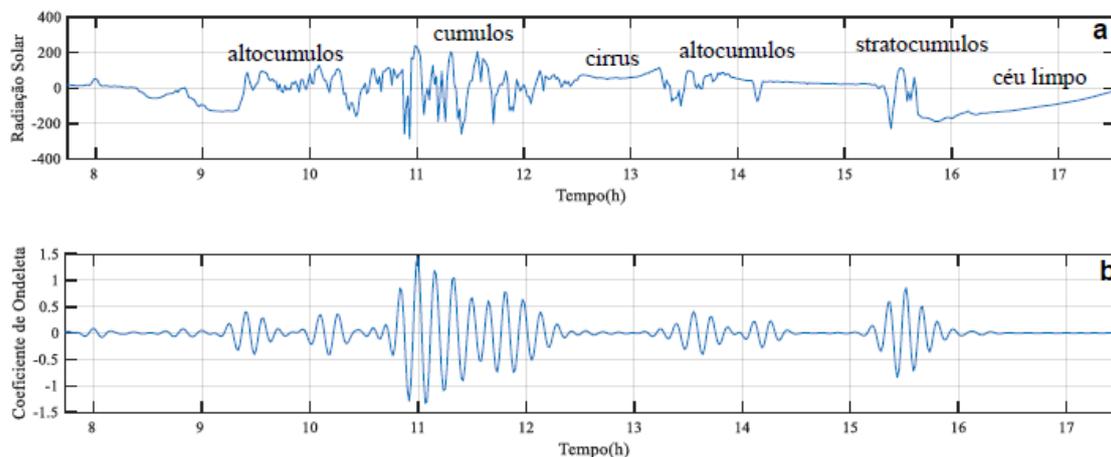


Figura 4: a) Sinal de radiação solar diária para o dia 17 de junho de 2014, onde é possível verificar a presença de nuvens do tipo altocumulos entre 9h30 e 10h30, nuvens do tipo cumulos entre 10h30 e 12h20, nuvens cirrus entre 12h20 e 13h10, nuvens altocumulos entre 13h10 e 14h15 e nuvens stratocumulos entre 15h15h e 15h45 . b) coeficiente da transformada de wavelet para o período de 9 minutos.

Na Fig 4.b, é possível perceber que a transformada apresenta de forma mais expressiva sinais para três tipos de nuvens. As nuvens cumulus, estão bem definidas, e acredita-se que essas mesmas estejam bem representadas. É possível ver ainda na Fig 4.b, dois outros sinais, que comparados a Fig. 4.a, classificam-se como altocumulus e stratocumulus. Porém, como não houveram muitos casos desse tipo de nuvem no período estudado são necessárias mais análises para confirmar a representatividade dos sinais.

## 5 Considerações Finais

Nesse estudo atingiu-se parcialmente o objetivo, tendo em vista que foi apenas uma análise inicial utilizando um período pequeno. Até o momento foi possível perceber que o método de identificação de nuvens proposto por Falconer (1965) é eficiente para identificar as nuvens através dos dados de radiação solar. E a transformada de wavelet representa adequadamente nuvens do tipo cúmulos, apresentando um sinal expressivo para a mesma, o que demonstra que o método é promissor para o objetivo pretendido.

Sendo assim é necessário ampliar o período de estudo, utilizando mais dias de dados, para então definir sinais para outros tipos de nuvens e assim será possível desenvolver um método mais objetivo que facilite a identificação das nuvens presente durante o dia.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradecemos ao professor David R. Fitzjarrald pela sugestão de aplicação.

## Referências

Falconer, R. (1965). A Simple Method for Obtaining a Continuous Record of the Presence and Type of Clouds in the Sky During the Day. **Pure and Applied Geophysics**, 60, 236–244. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF00874827>

Porrini, C., & Boezio, C. (2017). SOLAR IRRADIATION FORECASTING USING WRF REGIONAL MODEL: A CASE OF STUDY IN URUGUAY. **Anais do X Workshop de micrometeorologia**, 6–10. Recuperado de <https://www.even3.com.br/Anais/micrometeorologia2017/67062-SOLAR-IRRADIATION-FORECASTING-USING-WRF-REGIONAL-MODEL--A-CASE-OF-STUDY-IN-URUGUAY>

Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 79, 61–78. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/15200477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/15200477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2)

World Meteorological Organization's (WMO). (2017). **International Cloud Atlas**. Recuperado 10 de junho de 2018, de <https://cloudatlas.wmo.int/home.html>

Trabalho publicado nos anais do *Congreso Argentino de Meteorología* (CONGREGMET), 2018.

## **PROPOSTA DE IDENTIFICAÇÃO DE TIPO DE NUVEM**

Karina S. SEIDE<sup>1,2</sup>, Nisia Krusche<sup>2</sup>  
karinaseide@furg.br, nkrusche@furg.br

<sup>1</sup>Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional (Universidade Federal do Rio Grande, Brasil)  
<sup>2</sup>Laboratório de Física Ambiental (Centro de Ciências Computacionais, Universidade Federal do Rio Grande, Brasil)

### **RESUMO**

Classificar nuvens é importante para melhorar os processos de previsão de tempo e clima. Pensando nisso, utilizou-se dados de radiação solar, e técnicas de análise do tipo de nuvens para identificar as nuvens presente durante o dia no município de Rio Grande,RS, Brasil. Os dados de radiação utilizados foram obtidos a partir de uma torre meteorológica localizada na Universidade Federal do Rio Grande. Foi utilizada a transformada de ondeleta para gerar padrões e assim facilitar a identificação das nuvens, hoje feita de forma visual.

### **ABSTRACT**

Classifying clouds is important for improving weather and climate forecasting processes. With this in mind, we used solar radiation data and cloud type analysis techniques to identify the clouds present during the day in the city of Rio Grande, RS, Brazil. The radiation data used were obtained from a meteorological tower located at the Federal University of Rio Grande. The wavelet transform was used to generate patterns and thus facilitate the identification of the clouds, now made visually.

**Palavras chave:** Classificação de nuvens, radiação solar, transformada de ondeleta.

## **INTRODUÇÃO**

Classificar nuvens é importante para melhorar os processos de previsão de tempo e clima. O estudo do tipo de nuvens presente durante o dia em uma determinada região pode ser feito através de equipamentos simples, que captem as sombras formadas pelas nuvens na luz do sol. Falconer (1965) desenvolveu um método de análise do tipo de nuvem através dessas sombras formadas. O autor demonstra em seu trabalho os traçados mais característicos de cada tipo de nuvem e maneiras de identifica-las.

Para esse trabalho serão utilizados dados de radiação solar, buscando identificar as nuvens, conforme o autor indica em seu trabalho. Em sequência será utilizada a transformada de ondeleta, para identificar os padrões e assim obter um método matemático para facilitar a classificação das nuvens.

## **METODOLOGIA**

Neste trabalho foram utilizados dados de radiação solar, provenientes de uma torre meteorológica localizada na Universidade Federal do Rio Grande, no município de Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil. Os dados são medidos com uma frequência de 1 Hz através de um piranômetro, modelo 11696, série CMP3, da marca Campbell Scientific, instalado a 6 metros de altura. Foram utilizados os dados dos dias 17 a 23 de junho de 2014.

Para a utilização da transformada de ondeleta foi realizado um ajuste de curva nos dados, através das equações propostas por Stull (1988, p.257), referentes ao ângulo de elevação do sol. Através das equações foi calculado o ângulo de elevação do sol, para a latitude de  $-32^{\circ} 02' 06''$  e longitude de  $-52^{\circ} 05' 55''$ , para os dias utilizados neste estudo. Para melhor ajuste aos dados utilizados, um deslocamento foi feito no gráfico obtido a partir das equações, a fim de alinhar o primeiro valor positivo da elevação com o horário de nascer do sol para os dias utilizados.

## **RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES**

Na figura 1.a, estão classificadas as nuvens para o dia 17 de junho de 2014, conforme Falconer (1965). Essa classificação foi feita comparando os dados obtidos com o que indica o autor. É possível perceber que na maior parte

do tempo existem nuvens baixas, principalmente nuvens cumulus. Na figura 1.b, está representada a parte real dos sinais da transformada para o período de maior variância de ondeleta, sendo neste caso 9 minutos.

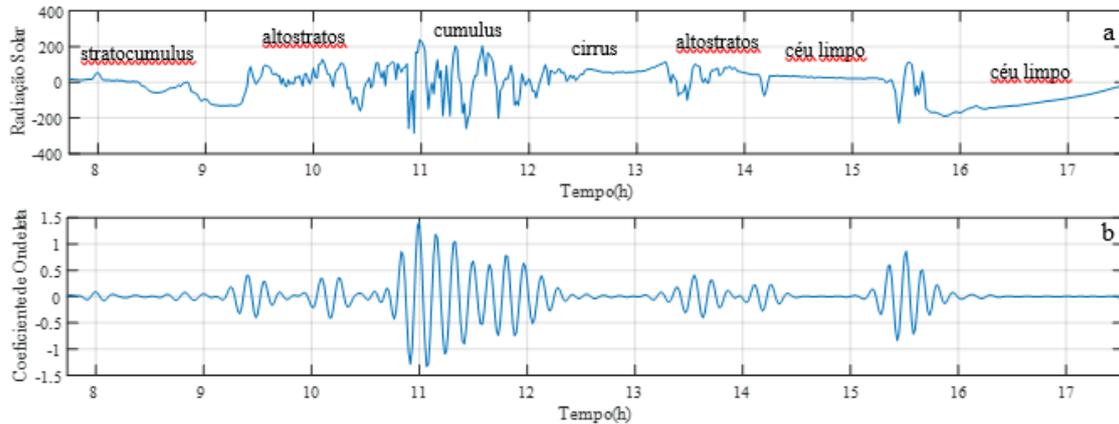


Figura 1: a) Tipos de nuvem presente no dia 17 de junho de 2014. b) transformada de ondeleta.

## CONCLUSÕES

A transformada de ondeleta permite identificar adequadamente as nuvens do tipo cumulus, apresentando um sinal bem expressivo para esse tipo de nuvem. Os próximos estudos buscaram conseguir diferenciar os sinais para os outros tipos de nuvens.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa concedida, e ao professor David R. Fitzjarrald pela sugestão de aplicação.

## REFERÊNCIAS

- Falconer, R. E. A simple method for obtaining a continuous record of the presence and type of clouds in the sky during the day. **Pure and Applied Geophysics**, vol. 60, p. 236–244, 1965.
- STULL, R.B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. KluwerAcademic., 1988.