

# PREVISÃO DE CURTO PRAZO DA RADIAÇÃO SOLAR NO BRASIL USANDO MOVIMENTO DAS NUVENS COM BASE EM DADOS DE SATÉLITE

**Francisco José Lopes de Lima** (INPE) - francisco.lopes.lima@gmail.com

**Rodrigo Santos Costa** (INPE) - rodrigo.costa@inpe.br

**Eduardo dos Santos Pereira** (INPE) - eduardo.santos@inpe.br

**André Rodrigues Goncalves** (INPE) - andre.goncalves@inpe.br

**Diogo Nunes da Silva Ramos** (INPE) - diogonsramos@gmail.com

**Madeleine Sánchez Gácita Casagrande** (UNIFESP) - madeleine.gacita@inpe.br

**Fernando Ramos Martins** (UNIFESP) - fernando.martins@unifesp.br

**Jefferson Gonçalves de Souza** (INPE) - jefferson.souza@inpe.br

**Enio Bueno Pereira** (INPE) - enio.pereira@yahoo.com.br

## **Resumo:**

*Um dos principais desafios apontados para o futuro passa pela redução da dependência de combustíveis fósseis, apostando em um aumento da integração e aproveitamento energético de recursos renováveis. A integração em grande escala de fontes de energia renovável intermitentes nos sistemas elétricos é um grande desafio e já vem sendo enfrentado por países como Alemanha, Espanha, Portugal e Itália. Outros países devem se juntar a estes nos próximos anos, incluindo o Brasil. A energia solar que incide na superfície terrestre varia principalmente devido à presença de nebulosidade, tendo uma grande influência na produção de energia elétrica a partir das tecnologias de aproveitamento do recurso solar. Dado o caráter intermitente da produção de uma central solar, torna-se necessário o desenvolvimento de ferramentas que permitam a integração bem-sucedida destas centrais na rede elétrica e possibilitem apoiar o operador do sistema na tomada de decisões com vista a atenuar o impacto negativo das variações rápidas da produção das centrais solares. Existem duas abordagens básicas para a realização de previsão do recurso solar. Uma delas baseia-se nos modelos numéricos de previsão do tempo (previsão numérica de tempo - PNT). Estes modelos inferem o local da formação da nuvem através de modelagem da dinâmica da atmosfera. A outra abordagem consiste em projetar a posição e o impacto futuro da nebulosidade a partir do movimento estimado das nuvens a partir de observações com uso de satélites ou a partir de instrumentos apropriados instalados em superfície. O presente trabalho tem por meta o desenvolvimento e avaliação de uma metodologia para previsão de irradiação solar na superfície utilizando CMV (modelo de previsão do movimento da nuvem). A proposta visa implantar uma metodologia e reduzir incertezas das estimativas das previsões usando o modelo de transferência radiativa Brasil-SR usando como dados de entrada o algoritmo CMV.*

**Palavras-chave:** BRASIL-SR, Cloud Motion, Previsão de Curto Prazo

**Área temática:** Radiação Solar

**Subárea temática:** Recursos Solares e Meteorologia da Radiação Solar

# PREVISÃO DE CURTO PRAZO DA RADIAÇÃO SOLAR NO BRASIL USANDO MOVIMENTO DAS NUVENS COM BASE EM DADOS DE SATÉLITE

**Francisco José Lopes de Lima** - [francisco.lopes@inpe.br](mailto:francisco.lopes@inpe.br)

**Rodrigo Santos Costa** – [rodrigo.costa@inpe.br](mailto:rodrigo.costa@inpe.br)

**Eduardo S. Pereira** – [eduardo.santos@inpe.br](mailto:eduardo.santos@inpe.br)

**André Rodrigues Gonçalves** – [andre.goncalves@inpe.br](mailto:andre.goncalves@inpe.br)

**Diogo N. S. Ramos** – [diogo.ramos@inpe.br](mailto:diogo.ramos@inpe.br)

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Ciência do Sistema Terrestre

**Madeleine Sánchez Gácita Casagrande** – [madeleine.gacita@unifesp.br](mailto:madeleine.gacita@unifesp.br)

**Fernando Ramos Martins** – [fernando.martins@unifesp.br](mailto:fernando.martins@unifesp.br)

Universidade Federal do Estado de São Paulo, Instituto do Mar

**Jefferson Gonçalves de Souza** – [jefferson.souza@inpe.br](mailto:jefferson.souza@inpe.br)

**Enio Bueno Pereira** – [enio.pereira@inpe.br](mailto:enio.pereira@inpe.br)

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Ciência do Sistema Terrestre

**Resumo.** Um dos principais desafios apontados para o futuro passa pela redução da dependência de combustíveis fósseis, apostando em um aumento da integração e aproveitamento energético de recursos renováveis. A integração em grande escala de fontes de energia renovável intermitentes nos sistemas elétricos é um grande desafio e já vem sendo enfrentado por países como Alemanha, Espanha, Portugal e Itália. Outros países devem se juntar a estes nos próximos anos, incluindo o Brasil. A energia solar que incide na superfície terrestre varia principalmente devido à presença de nebulosidade, tendo uma grande influência na produção de energia elétrica a partir das tecnologias de aproveitamento do recurso solar. Dado o caráter intermitente da produção de uma central solar, torna-se necessário o desenvolvimento de ferramentas que permitam a integração bem-sucedida destas centrais na rede elétrica e possibilitem apoiar o operador do sistema na tomada de decisões com vista a atenuar o impacto negativo das variações rápidas da produção das centrais solares. Existem duas abordagens básicas para a realização de previsão do recurso solar. Uma delas baseia-se nos modelos numéricos de previsão do tempo (previsão numérica de tempo - PNT). Estes modelos inferem o local da formação da nuvem através de modelagem da dinâmica da atmosfera. A outra abordagem consiste em projetar a posição e o impacto futuro da nebulosidade a partir do movimento estimado das nuvens a partir de observações com uso de satélites ou a partir de instrumentos apropriados instalados em superfície. O presente trabalho tem por meta o desenvolvimento e avaliação de uma metodologia para previsão de irradiação solar na superfície utilizando CMV (modelo de previsão do movimento da nuvem). A proposta visa implantar uma metodologia e reduzir incertezas das estimativas das previsões usando o modelo de transferência radiativa Brasil-SR usando como dados de entrada o algoritmo CMV. Os resultados mostram que à medida que aumentamos o horizonte de previsão o modelo tende a aumentos as incertezas das previsões.

**Palavras-chave:** BRASIL-SR, Cloud Motion, Previsão de Curto Prazo

## 1. INTRODUÇÃO

O aproveitamento da energia a partir da radiação solar incidente na superfície da Terra é uma alternativa para complementar a matriz energética brasileira, que atualmente é primariamente baseada em sistemas de geração hidroelétrica e termoelétricas alimentadas com uso de combustíveis fósseis (ANEEL, 2015; PEREIRA et al., 2017). A conversão de energia solar em energia elétrica ou térmica possui impactos ambientais reduzidos e emissão de poluentes nula durante a operação da planta de geração. Contudo, existem desafios ainda não solucionados, relacionados à variabilidade de oferta e dependência das condições de tempo e clima. Desta forma, no cenário atual, a energia solar e outras energias renováveis serão gradativamente inseridas de forma a complementar as atuais fontes através de sistemas energéticos híbridos e de geração distribuída. As limitações ao uso da energia solar tendem a ser reduzidas ou até mesmo eliminadas com o tempo, principalmente em resposta ao crescimento da demanda de energia mundial. A tendência é que isso ocorra devido ao crescimento econômico de países em desenvolvimento, ao aparecimento de novas tecnologias de armazenamento de energia e ao crescimento da escala de mercado dessas tecnologias.

Por ser um país localizado em sua maior parte na região intertropical, o Brasil possui grande potencial de energia solar ao longo de todo o seu território. Entretanto, para que se possa otimizar o investimento de implantação dos empreendimentos solares e sua exploração eficiente, faz-se necessário o mapeamento das regiões com maior disponibilidade, os potenciais de utilização e as incertezas associadas à sua variabilidade, o que influencia o uso desta fonte. Além disso, o conhecimento e previsão do potencial disponível de energia solar tem um papel extremamente

importante no apoio ao setor energético, no planejamento de operação do sistema elétrico do País e na operação de plantas de geração solar como as fotovoltaicas (PV) e solares térmicas (CSP) (MARTINS et al., 2006, 2008a, 2008b)

Mesmo com o potencial solar já reconhecido no território brasileiro através de publicações que realizaram a quantificação do recurso solar (PEREIRA et al., 2006, 2017; TIBA et al., 2000), dados confiáveis sobre essa variável ainda são escassos no País. Lima et al., 2016; Martins et al., 2007; Souza et al., 2011; Viana et al., 2011, ao investigarem a disponibilidade e a variabilidade da irradiação solar no Brasil, enfrentaram muitas limitações em função da baixa densidade de estações radiométricas no território brasileiro.

As simulações numéricas de variáveis atmosféricas de modelos de previsão de tempo e clima são informações valiosas para o planejamento de atividades de importância econômica e estratégica, como a geração de energia. Os produtos destes modelos são resultado da interação de diversas variáveis meteorológicas, como a radiação solar, o vento, a temperatura, a umidade relativa, entre outras. Atualmente, além de uma gama de informações provenientes de satélites e de redes de estações de superfície, a comunidade científica também dispõe de modelos numéricos de alta resolução espacial e temporal, capazes de simular os processos físicos relacionados com estas variáveis meteorológicas. Neste sentido, é necessário conhecer a incerteza associada aos resultados destes modelos numéricos e assim subsidiar a tomada de decisões.

Prever a radiação solar, mesmo com um dia de antecedência, envolve muitas incertezas. Parte deste problema está relacionado ao fato da incidência de radiação solar na superfície ser dependente das condições meteorológicas, especialmente nuvens, tratando de processos físicos não lineares de transmissão de radiação na atmosfera. Resultados obtidas em estudos anteriores mostram que modelos baseados no movimento da nuvem (na sigla e inglês *CMV – Cloud Motion Vector*) tendem a proporcionar melhores resultados que modelos de Previsão Numérica do Tempo (PNT) para um horizonte de previsão de até 6 horas. Acima desta escala temporal, os modelos PNT apresentam melhor desempenho (PEREZ et al., 2010).

O objetivo deste trabalho é avaliar soluções para uma nova ferramenta de previsão de irradiação solar no Brasil, usando a previsão da dinâmica de nuvens (CMV) por imagens de satélite para um horizonte de até 4 horas. Os resultados destas avaliações iniciais apresentam grande potencial para auxiliar no planejamento e operação do setor energético brasileiro, principalmente para as regiões de maior disponibilidade do recurso solar, promovendo a diversificação da matriz elétrica nacional por meio do crescimento da participação da energia solar na geração de eletricidade.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Área de estudo e dados medidos (rede SONDA)

Este tópico descreve, sucintamente, as principais características climatológicas das regiões do Brasil, onde estão localizadas as estações solarimétricas usadas no presente trabalho, e de alguns dos sistemas meteorológicos mais frequente observados nestas regiões.

O clima do Brasil é bastante diverso em consequência de muitos fatores, como extensão territorial, o relevo, influência da região tropical e a consequente dinâmica das massas de ar. A Fig. 1 apresenta o relevo brasileiro, justamente com a localização das estações solarimétricas, que possui influência direta nas condições de tempo e de clima de uma região. Pontos mais elevados tendem a ser mais frios, além de criarem condições propícias para a formação de nebulosidade através da condensação por levantamento nas encostas. A dinâmica atmosférica é de suma importância porque atua diretamente tanto na temperatura quanto na precipitação, provocando as diferenças climáticas regionais. O Brasil experimenta diferentes padrões de precipitação em seu território, variando de regiões com valores bastante elevados - como a Amazônia - até outras bastante reduzidas, como o semiárido nordestino.

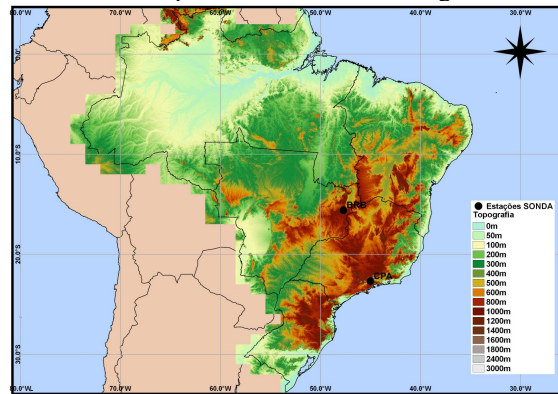
A Região Nordeste do Brasil possui uma área territorial de 1.558.196 km<sup>2</sup>, correspondendo ao terceiro maior território do país (18% do território nacional). Segundo (KAYANO; ANDREOLI, 2009), a região costuma ser dividida em três climas principais, com precipitações anuais variando entre 300 e 2000 mm: clima litorâneo úmido, estendendo-se do litoral da Bahia ao do Rio Grande do Norte; clima tropical, em áreas dos estados da Bahia, Ceará, Maranhão e Piauí; e clima tropical semiárido, em todo o sertão nordestino. O Nordeste apresenta elevados valores de médias anuais de temperatura do ar, que variam de 20 a 28 °C, em virtude da alta incidência de radiação solar, que o confere o maior potencial de energia solar disponível no Brasil, com uma irradiação global média estimada em 5,49 kWh/m<sup>2</sup>.dia pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar. (KAYANO; ANDREOLI, 2009; PEREIRA et al., 2017).

A Região Centro-Oeste ocupa uma área de aproximadamente 1.607.000 km<sup>2</sup> (18% do território nacional), possuindo a maior área alagada do mundo, o Pantanal, e uma vegetação composta predominantemente de cerrado. Na Região Centro-Oeste, a média de precipitação registrada na região é de 1500 mm/ano, porém o norte do Mato Grosso apresenta precipitação anual média superior a 1800 mm/ano. Em média, 70% do total de precipitação acumulada ocorre durante o verão e outono, e apenas 5% nos meses de inverno (ALVES, 2009). As médias de temperaturas máximas oscilam entre 33 °C no norte e 26 °C no sul durante a primavera e o verão. No inverno, devido à atuação de massas de ar frio, as temperaturas tornam-se mais baixas, podendo até mesmo atingir valores próximos de zero grau Celsius em algumas áreas. Nesta estação do ano, as temperaturas médias oscilam entre 20 °C e 25 °C (ALVES, 2009). O Atlas Brasileiro de Energia Solar estima a irradiação global média em 5,07 kWh/m<sup>2</sup>.dia para a região (PEREIRA et al., 2017).

A Região Sudeste compreende uma área territorial de 924.935 km<sup>2</sup>, e possui a maior concentração populacional do país, em torno de 42,6% do total do Brasil (NUNES; KOGA VICENTE; CANDIDO, 2009). A grande concentração

populacional e o maior desenvolvimento econômico do país, no entanto, tornam a região consideravelmente sensível às condições climáticas (NUNES; KOGA VICENTE; CANDIDO, 2009). Em termos de temperatura, a Região Sudeste apresenta grandes amplitudes térmicas, em especial no estado de São Paulo, devido à sua posição mais ao sul. O oeste de São Paulo, norte de Minas Gerais e todo o litoral da Região Sudeste apresentam médias superiores a 22 °C. As áreas centrais de São Paulo e Minas Gerais, assim como o norte do Rio de Janeiro, sul do Espírito Santo e litoral sul de São Paulo, possuem médias anuais de temperatura entre 19 °C e 21 °C. Já os setores montanhosos de São Paulo e Minas Gerais apresentam médias entre 14 °C e 18 °C (NUNES; KOGA VICENTE; CANDIDO, 2009). O Atlas Brasileiro de Energia Solar estima em 5,06 kWh/m<sup>2</sup>.dia a disponibilidade de irradiação solar global média para a região (PEREIRA et al., 2017).

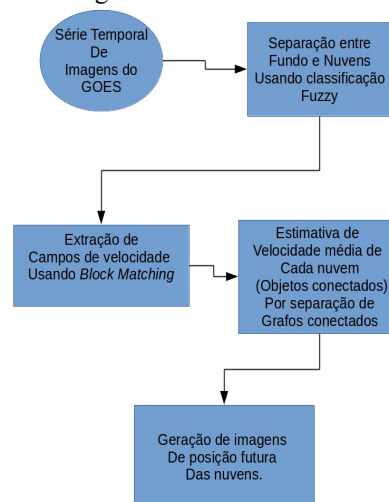
A Rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) <<http://sonda.ccst.inpe.br/>> é um esforço coordenado pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) que conta com a colaboração de vários institutos de pesquisa e universidades brasileiras. Tendo entrado em operação em 2004, atualmente a rede dispõe de 17 estações de observação distribuídas estrategicamente para representar as diferentes características climáticas do Brasil. Doze dessas estações são operadas pelo INPE, enquanto instituições parceiras mantêm e operam as outras cinco. Os procedimentos de operação e manutenção seguem as recomendações estabelecidas pela WMO (*World Meteorological Organization*) para a BSRN (*Baseline Surface Radiation Network*), que definem critérios para as estações. A aquisição de dados é realizada em intervalos de um segundo e o armazenamento de valores médios a cada um minuto, com as manutenções de rotina realizadas semanalmente pelos operadores locais. Para esse estudo foram utilizadas as estações localizadas em Brasília-DF (BRB) e Cachoeira Paulista-SP (CPA). A localização da área de estudo, bem como, as localizações das estações utilizadas neste estudo, pode ser verificada na Fig. 1.



**Figura 1.** Área de estudo e domínio do modelo BRASIL-SR e em preto as localizações das estações Brasília - DF (BRB) e Cachoeira Paulista - SP (CPA), bem como a topografia da região.

## 2.2 Algoritmo CM-SAT

Usando sequências de imagens de satélite é possível realizar a previsões do campo de nebulosidade com prazos de até 6 horas (HEINEMANN; LORENZ; GIRODO, 2006; LORENZ; HAMMER; HEINEMANN, 2004; PEREZ et al., 2010; REMUND; PEREZ; LORENZ, 2008). Neste trabalho foi avaliada a previsão de radiação solar usando o algoritmo de geração de imagens sintéticas de satélite para a previsão de curto prazo do campo de nebulosidade. A vantagem de tal modelagem é que modelos diagnósticos que usam dados de satélite para estimar em tempo real a radiação solar recebida em solo, podem utilizar os dados gerados pelo algoritmo CM-SAT e assim se tornarem modelos de previsão. Na Fig. 2, tem-se o fluxograma do algoritmo desenvolvido.



**Figura 2.** Algoritmo de geração de imagens de previsão de curto prazo para o campo de nebulosidade.

Assim, em linhas gerais, o processo de geração de imagens de previsão segue um processamento em linha (*pipeline*), em que se separam campos de nuvens utilizando um classificador fuzzy. Os campos extraídos são analisados em sequência temporal, com a finalidade de extração do campo de velocidades. Em seguida, é realizada a estimativa da velocidade típica de cada nuvem, que é tratada de forma individual, sendo realizado o deslocamento das mesmas de acordo com seu vetor de movimento próprio. Em seguida, as camadas individuais de nuvens são combinadas, formando uma imagem final.

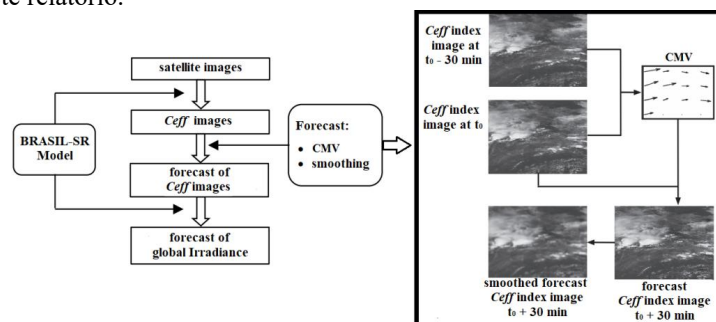
Uma vez criado o campo de nebulosidade para estimar movimentos a partir de sequência de imagens, utiliza-se o algoritmo chamado *block matching* (BM). Tal algoritmo consiste em comparar pequenos blocos de uma imagem, no instante de tempo  $t_{i-1}$ , dentro de janelas, em uma imagem no instante de tempo seguinte,  $t_i$  (CUEVAS et al., 2013; PENG et al., 2016). Uma vez gerado as imagens sintéticas, as mesmas são usadas como dados de entrada no modelo BRASIL-SR para a previsão da radiação solar. Na seção abaixo descreveremos sucintamente o modelo.

### 2.3 O modelo BRASIL-SR

Trata-se de um modelo físico utilizado na obtenção de estimativas e previsão da irradiação solar incidente na superfície que teve como base o modelo alemão IMGK (STUHLMANN; RIELAND; RASCHKE, 1990). Utilizando a aproximação de “Dois-fluxos” na solução da equação de transferência radiativa, o BRASIL-SR faz uso de dados climatológicos previstos pelo modelo global GFS (*Global Forecast System*), temperatura do ar, albedo de superfície, umidade relativa, visibilidade atmosférica e elevação da superfície (MARTINS; PEREIRA, 2011). A cobertura de nuvens é considerada como principal fator de modulação da transmitância atmosférica, sendo determinada a partir de das projeções das imagens de satélite geoestacionário usando o algoritmo CM-SAT (*Cloud Motion from Satellite*), onde o movimento das nuvens em cada instante é extraído pela sequência de imagens de satélite. Os arquivos com os dados de entrada são preparados através da base de dados do modelo global e do processamento das imagens futuras para o período de execução, onde é obtida a cobertura efetiva de nuvens.

Após o tratamento dos dados de entrada, o modelo resolve a equação de transferência radiativa utilizando a aproximação de “Dois-Fluxos” para o cálculo das componentes do fluxo de radiação solar previstos. As previsões de irradiação solar fornecidas pelo modelo BRASIL-SR foram validadas por meio de comparação com valores medidos em superfície, descrito no tópico anterior e pelas estimativas usando as imagens originais do satélite GOES-13.

Foram realizadas previsões de radiação solar em todas as estações da rede SONDA para o período agosto de 2015 e março de 2016 através das integrações do modelo BRASIL-SR, utilizando como dados de entrada as imagens originais do satélite e as geradas pelo algoritmo CM-SAT. Com isso, foram realizadas comparações entre a radiação solar gerada com a imagens originais do satélite e a imagens geradas pelo algoritmo de CM-SAT, para termos uma ideia inicial dos erros associados ao sistema de previsão usando movimentação das nuvens. A Fig. 3 ilustra basicamente a metodologia utilizada neste relatório.



**Figura 3.** Esquema de previsão de curto prazo (até 6 horas de antecedência) usando métodos estatísticos em imagens de satélite do GOES.

### 2.4 Metodologia

As simulações com o modelo BRASIL-SR utilizaram imagens dos canais visível do satélite GOES 13 e imagens projetadas para o futuro a partir das imagens do GOES 13 usando o algoritmo CM-SAT, para os meses de agosto/2015 e março de 2016, para os horizontes de previsão de 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas e 4 horas, no intuito de avaliarmos, além da capacidade de previsão do modelo, a sua previsibilidade para diversos horizontes. As imagens (originais e projetadas) foram usadas para determinação dos coeficientes de cobertura de nuvens. Também foram utilizadas previsões diárias de temperatura do ar, umidade relativa e visibilidade horizontal oriundos do modelo GFS, além de dados de espessura óptica dos aerossóis em 550 nm de reanálises do MACC/ECMWF (INNESS et al., 2013). A resolução espacial das saídas do modelo BRASIL-SR é de aproximadamente 3km x 5km.

A confiabilidade de uma série de dados fornecidos por modelos numéricos deve ser avaliada por meio de comparação com os dados observados. Em geral, esse processo de validação é focado na diferença do Erro Quadrático Médio (*RMSE*), e na diferença do *Viés*, ou do termo em inglês, *bias*, como mostra em estudos como os de (ARGIROU

et al., 1999; PEREZ; SEALS; ZELENKA, 1997; RIGOLLIER; LEFÈVRE; WALD, 2004; SCHILLINGS; MEYER; MANNSTEIN, 2004).

O Viés é, dentre as consideradas aqui, é a mais simples medida de habilidade do modelo em gerar previsões. O Viés indica o erro sistemático, ou seja, subestimação ou superestimação em relação aos dados observados. Se for positivo, significa que os dados modelados tendem a superestimar os valores reais, enquanto, se for negativo significa que existe uma tendência do modelo em subestimar os mesmos valores. É dado por:

$$bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_o) \quad (1)$$

onde  $\phi_o$  é o valor observado da variável no  $i$ -ésimo instante do tempo,  $\phi_i$  é o valor da mesma variável produzida pelo modelo e  $N$  é o número de instante de tempo da série. O Viés pode assumir qualquer valor real e tem a mesma unidade da variável em análise. O valor mais próximo de zero representa o menor desvios entre estimativas e observações.

Já a raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) é dada pela soma dos quadrados das diferenças entre os resultados do modelo e observações:

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_o)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

O RMSE pode assumir qualquer valor positivo e tem a mesma unidade de medida das séries em estudo. Assim como o Viés, quanto mais próximo o valor do RMSE for de 0 maior a confiabilidade das estimativas fornecidas pelo modelo.

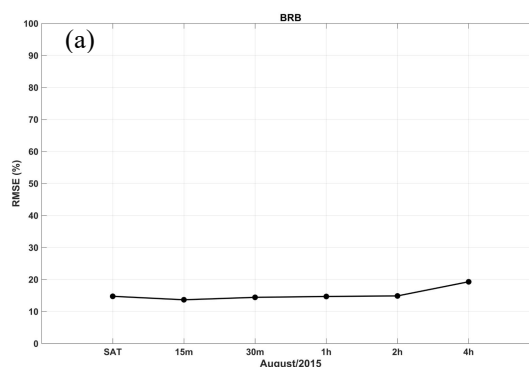
Para a análise dos resultados, também é avaliado o valor do coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), que permite uma interpretação da parcela da variância observada que é explicada pelo modelo.

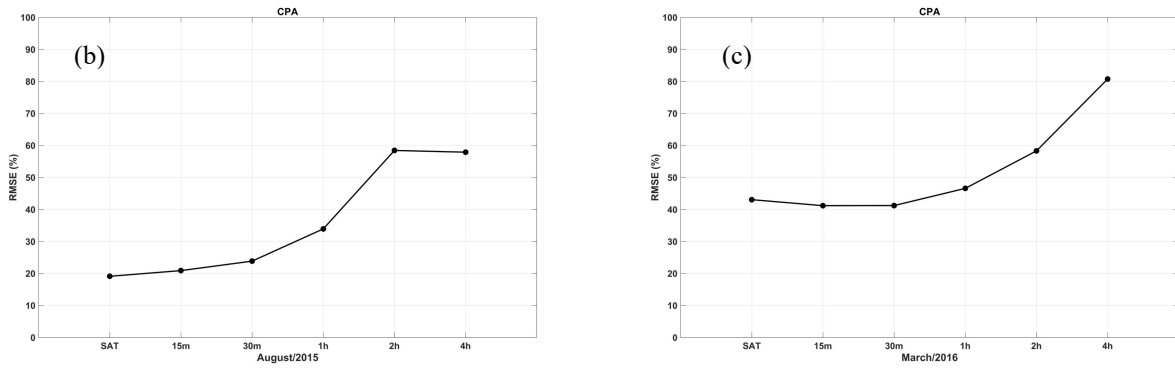
$$r = \frac{\sum (\phi_i - \bar{\phi}_i)(\phi_o - \bar{\phi}_o)}{\sqrt{\left[ \sum (\phi_i - \bar{\phi}_i)^2 \right] \left[ \sum (\phi_o - \bar{\phi}_o)^2 \right]}} \quad (3)$$

### 3. RESULTADOS

Na Fig. 4 tem-se uma avaliação preliminar na previsão de irradiação solar global usando imagens de satélite e as imagens geradas pelo algoritmo de *Cloud Motion Vector* (CMV) para os horizontes de 15m, 30m, 1h, 2h e 4h. A análise foi focada nos meses de agosto de 2015 (para as estações de Brasília (BRB) e Cachoeira Paulista (CPA)) e março de 2016 (para Cachoeira Paulista (CPA)). Observa-se para ambas as estações que o RMSE, em porcentagem, vai aumentando à medida que o horizonte de previsão aumenta, o que já era esperando em virtude das previsões de nebulosidade associadas ao modelo de CMV degradarem a medida que o tempo aumenta. Na Fig. 4(a) tem-se os resultados para BRB, (agosto/2015) onde as médias mensais do RMSE diários não apresentam grandes diferenças entre os horizontes de previsão, exceto para o horizonte de 4h, onde apresentou-se o maior erro.

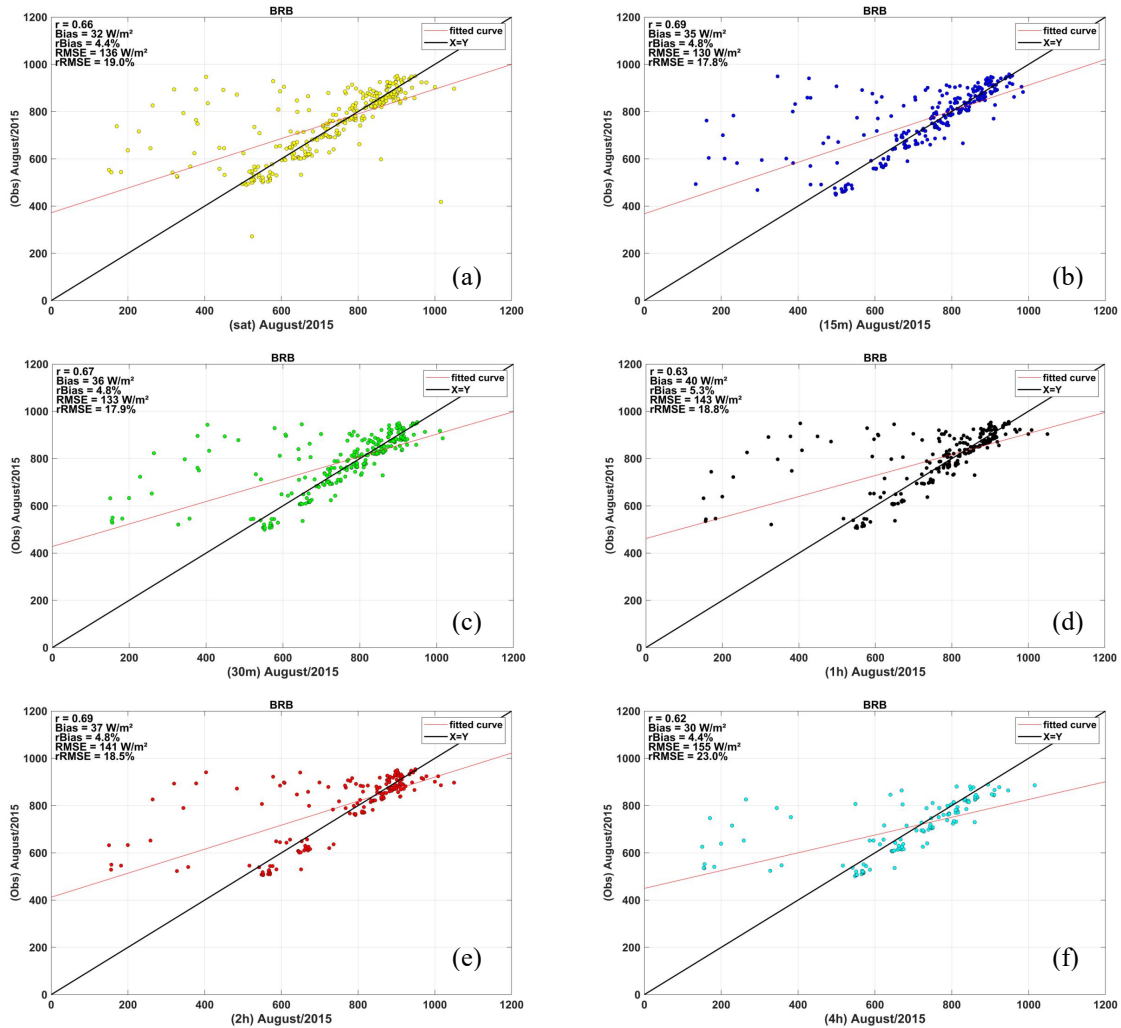
Nas Fig. 4(b) e 4(c) tem-se os resultados para CPA, agosto de 2015 e março de 2016, respectivamente. Fica evidente o aumento do erro ao longo do horizonte para ambos os meses. Em BRB observa-se erros menores quando comparados com CPA, provavelmente pelo fato de março de 2015 ter sido essencialmente de céu claro em BSB.



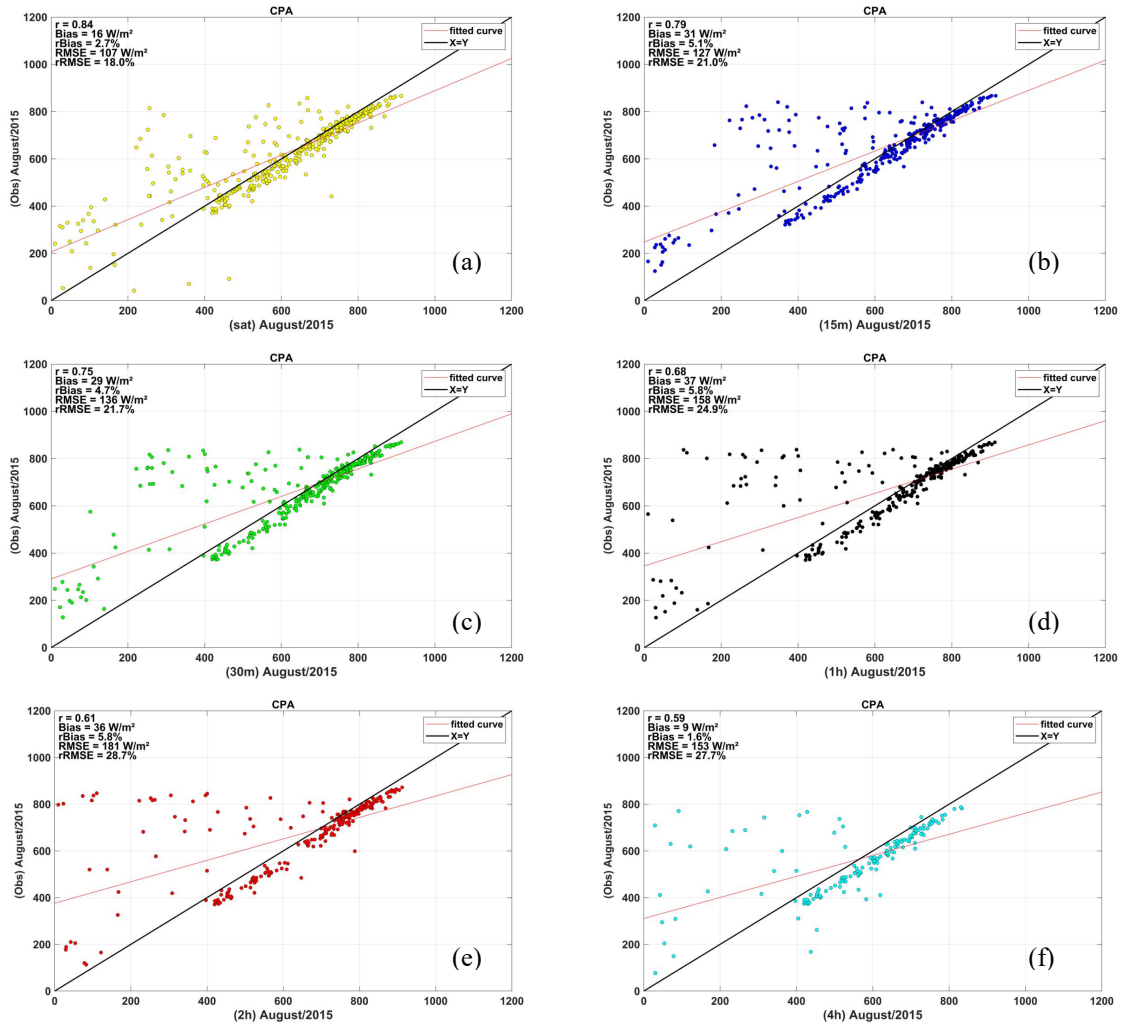


**Figura 4.** RMSE em porcentagem da previsão usando o modelo BRASIL-SR e o algoritmo de Cloud Motion (CMV) para agosto de 2015 e março de 2016. (a) agosto de 2015 para BRB, (b) agosto de 2015 para CPA e (c) março de 2016 para CPA.

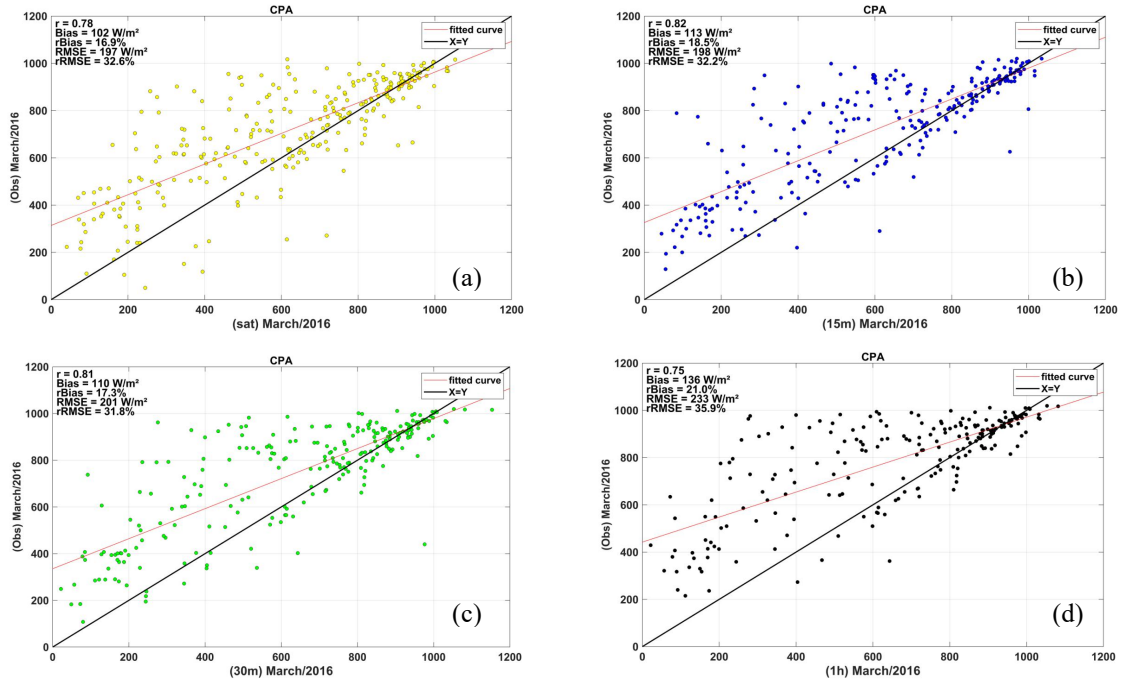
O comportamento das previsões do modelo e dos dados observados de irradiação solar global nas estações SONDA de Brasília e Cachoeira Paulista são apresentadas nas Fig. 5, 6 e 7, onde fica clara a tendência do modelo em superestimar os valores simulados, com o erro crescendo à medida que se aumenta o horizonte de previsão. Os valores médios mensais dos erros podem ser vistos no canto superior esquerdo de cada gráfico, onde (a) corresponde às estimativas com o satélite, (b) às previsões para o horizonte de 15 minutos, (c) às previsões para 30 minutos, (d) às previsões para 1 hora, (e) às previsões para 2 horas, (f) às previsões para 4 horas. Os resultados do modelo BRASIL-SR apresentam uma ligeira tendência de subestimativa, com as maiores diferenças em relação aos dados medidos observada no mês de março de 2016 em Cachoeira Paulista.



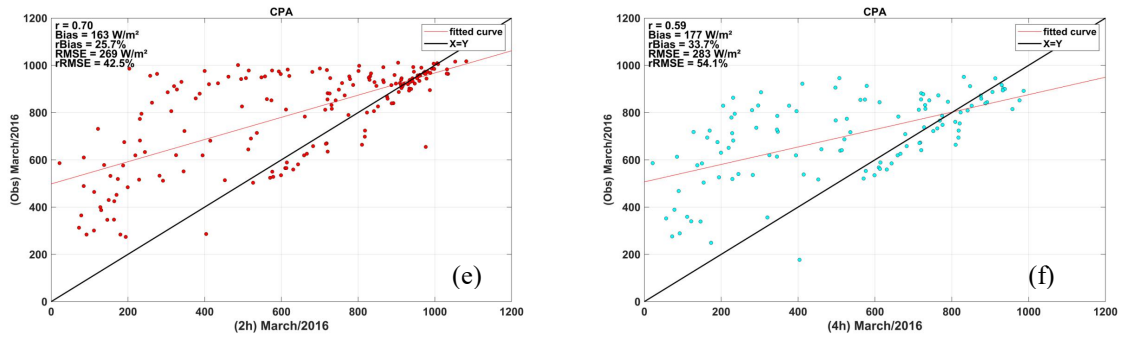
**Figura 5.** Previsão usando o BRASIL-SR e o algoritmo de Cloud Motion (CMV) para agosto de 2015 (Brasília). (a) estimativas com o satélite, (b) previsão com 15m usando CMV, (c) previsão com 30m usando CMV, (d) previsão com 1h usando CMV, (e) previsão com 2h usando CMV, (f) previsão com 4h usando CMV.



**Figura 6.** Previsão usando o BRASIL-SR e o algoritmo de Cloud Motion (CMV) para agosto de 2015 (Cachoeira Paulista). (a) estimativas com o satélite, (b) previsão com 15m usando CMV, (c) previsão com 30m usando CMV, (d) previsão com 1h usando CMV, (e) previsão com 2h usando CMV, (f) previsão com 4h usando CMV.





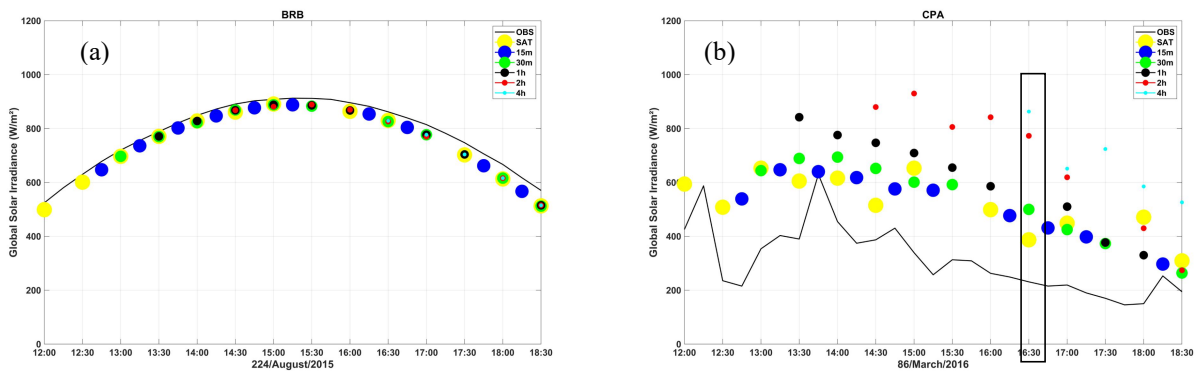


**Figura 7.** Previsão usando o BRASIL-SR e o algoritmo de Cloud Motion (CMV) para março de 2016 (Cachoeira Paulista). (a) estimativas com o satélite, (b) previsão com 15m usando CMV, (c) previsão com 30m usando CMV, (d) previsão com 1h usando CMV, (e) previsão com 2h usando CMV, (f) previsão com 4h usando CMV.

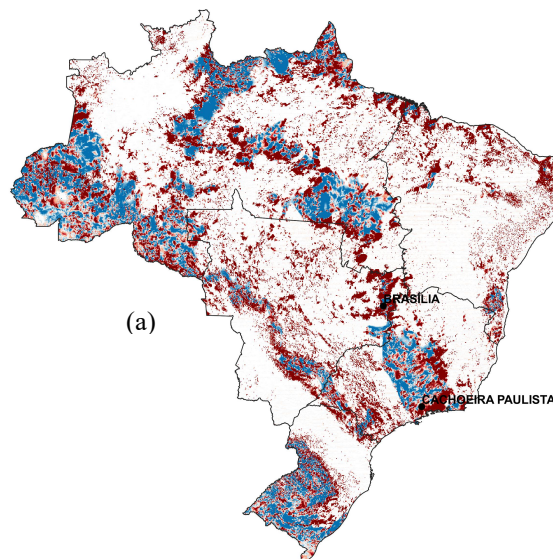
Na Fig. 8 tem-se um estudo de caso onde foram escolhidos os dias julianos de 83 e 224 para as duas estações SONDA usadas no trabalho, representando um dia de céu claro em Brasília e um dia Nublado em Cachoeira Paulista. Em amarelo são observadas as estimativas por satélite, em azul as previsões para 15 minutos, em verde as previsões para 30 minutos, em preto as previsões para 1 hora, em vermelho para 2 horas e em ciano para 4 horas.

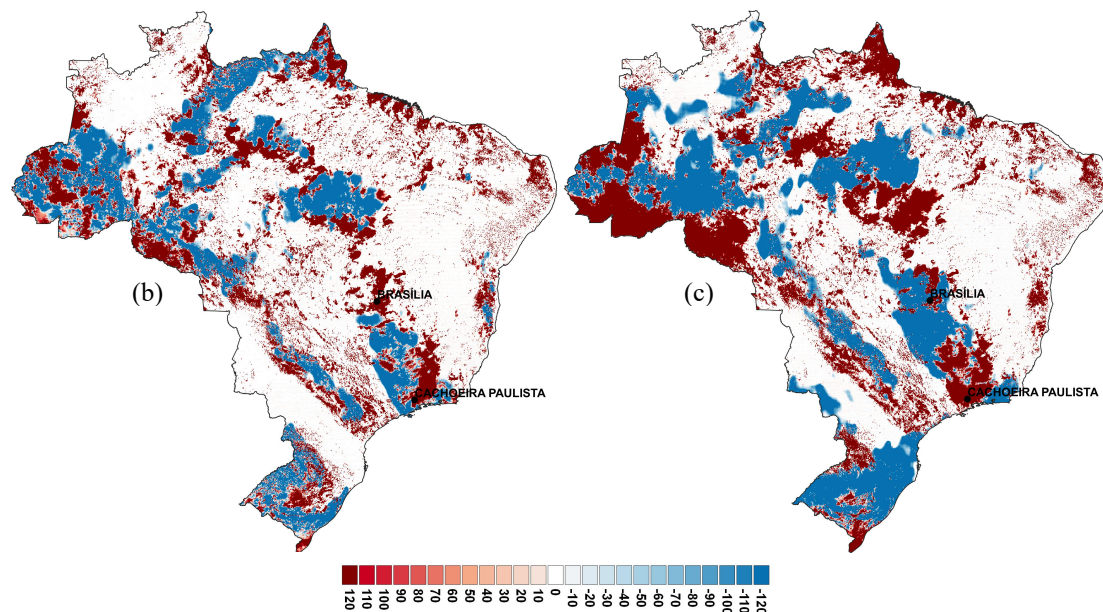
Na Fig. 8(a) - dia de céu claro - não são observadas mudanças significativas entre a estimativa por satélite e os horizontes de previsão. Já na Fig. 8(b), observa-se claramente um aumento significativo do erro à medida que é aumentado o horizonte de previsão.

Tanto a estimativa por satélite quanto as previsões tendem a superestimar os dados medidos. Ainda para avaliarmos o estudo de caso, foi escolhida simulação realizada para o horário de 16:30UTC, da Fig. 8(b). Foram gerados os mapas de diferença entre as previsões de 30m, 2h e 4h, disponíveis neste horário e as estimativas originais do satélite para verificarmos o aumento do erro em uma abordagem espacial.



**Figura 8.** Estudo de caso, (a) dia juliano 224/2015 na estação de Brasília (Céu Claro), (b) dia juliano 87/2016 na estação de Cachoeira Paulista (dia nublado).





**Figura 9.** Mapas das diferenças entre as previsões de 30 minutos (a), 2 horas (b) e 4 horas (c) e a estimativa de satélite original, para as 16:30 do dia juliano de 86 de março de 2016. A localizações das estações de Brasília e Cachoeira Paulista encontra-se nos mapas.

#### 4. CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho era o de avaliar o modelo Brasil-SR no modo de previsão para os horizontes de 15m, 30m, 1h, 2h e 4h. Para tal, dados do modelo BRASIL-SR utilizados na segunda edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar teve seu código ajustado para fazer previsões diária e foi implementado um algoritmo de CMV e foram confrontados com dados observados e o modelo Brasil-SR na sua versão original. As avaliações com dados de superfície da estação SONDA de Brasília e Cachoeira Paulista mostraram que as previsões superestimam a irradiação solar global. Entretanto, as principais feições e as características foram bem simuladas, mostrando também que a medida que aumentamos o horizonte de previsão os erros aumentam sistematicamente para a irradiação solar global, neste modo de previsão.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao suporte institucional e financeiro da Petrobras, através do projeto de P&D ANEEL PD-00553-0042/2016, vinculado à Chamada Estratégica n.º19/2015 – Desenvolvimento e Tecnologia Nacional de Geração Heliotérmica de Energia Elétrica. Agradecem também ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas (INCT-MC), através dos processos CNPq 573797/2008-0 e FAPESP 2008/57719-9. Por fim, ao apoio da FAPESP, através do processo 2019/05361-8.

#### REFERÊNCIAS

- ALVES, L. M. Clima da Região Centro-Oeste do Brasil. In: **Tempo e Clima no Brasil**. [s.l: s.n.]. p. 235–241.
- ANEEL. **Balanco energético nacional 2015**. [s.l: s.n.].
- ARGIROU, A. et al. Comparison of methodologies for tmy generation using 20 years data for Athens, Greece. **Solar Energy**, v. 66, n. 1, p. 33–45, 1 maio 1999.
- CUEVAS, E. et al. Block matching algorithm for motion estimation based on Artificial Bee Colony (ABC). **Applied Soft Computing Journal**, 2013.
- HEINEMANN, D.; LORENZ, E.; GIRODO, M. Forecasting of solar radiation. **Solar Energy Resource Management for Electricity Generation from Local Level to Global Scale**, n. chapter 2, p. 83–94, 2006.
- INNESS, A. et al. **The MACC reanalysis: An 8 yr data set of atmospheric composition Atmospheric Chemistry and Physics**, 2013.
- KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Clima da região Nordeste do Brasil. In: OFF (Ed.). **Tempo e Clima no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2009. p. 464.
- LIMA, F. J. L. L. et al. Forecast for surface solar irradiance at the Brazilian Northeastern region using NWP model and artificial neural networks. **Renewable Energy**, v. 87, p. 807–818, 2016.
- LORENZ, E.; HAMMER, A.; HEINEMANN, D. Short term forecasting of solar radiation based on satellite data. **EUROSUN2004 (ISES Europe Solar Congress)**, p. 841–848, 2004.

- MARTINS, F. R. et al. Mapeamento dos recursos de energia solar no brasil. **Xiv Cbmet**, 2006.
- MARTINS, F. R. et al. Brazilian Atlas for solar energy resource: Swera results. **ISES Solar World Congress 2007, ISES 2007**, v. 4, p. 2651–2655, 2007.
- MARTINS, F. R. et al. The influence of cloud cover index on the accuracy of solar irradiance model estimates. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 99, n. 3–4, p. 169–180, 2008a.
- MARTINS, F. R. et al. Solar energy scenarios in Brazil. Part two: Photovoltaics applications. **Energy Policy**, v. 36, n. 8, p. 2855–2867, 2008b.
- MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. Estudo comparativo da confiabilidade de estimativas de irradiação solar para o sudeste brasileiro obtidas a partir de dados de satélite e por interpolação/extrapolação de dados de superfície. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, n. 2, p. 265–276, 2011.
- NUNES, L.; KOGA VICENTE, A.; CANDIDO, D. **Clima da região Sudeste do Brasil**. [s.l: s.n.].
- PENG, Z. et al. A hybrid approach to estimate the complex motions of clouds in sky images. **Solar Energy**, v. 138, p. 10–25, 15 nov. 2016.
- PEREIRA, E. B. et al. Atlas Brasileiro de Energia Solar. p. 60, 2006.
- PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: [s.n.].
- PEREZ, R. et al. Validation of short and medium term operational solar radiation forecasts in the US. **Solar Energy**, v. 84, n. 12, p. 3079–3084, 2010.
- PEREZ, R.; SEALS, R.; ZELENKA, A. Comparing satellite remote sensing and ground network measurements for the production of site/time specific irradiance data. **Solar Energy**, v. 60, n. 2, p. 89–96, 1 fev. 1997.
- REMUND, J.; PEREZ, R.; LORENZ, E. Comparison of solar radiation forecasts for the USA. **European PV Conference**, v. 2, p. 3–5, 2008.
- RIGOLLIER, C.; LEFÈVRE, M.; WALD, L. The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. **Solar Energy**, v. 77, n. 2, p. 159–169, 2004.
- SCHILLINGS, C.; MEYER, R.; MANNSTEIN, H. Validation of a method for deriving high resolution direct normal irradiance from satellite data and application for the Arabian Peninsula. **Solar Energy**, v. 76, n. 4, p. 485–497, 1 abr. 2004.
- SOUZA, A. P. et al. Estimativas das componentes da radiação solar incidente em superfícies inclinadas baseadas na radiação global horizontal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 277–288, 2011.
- STUHLMANN, R.; RIELAND, M.; RASCHKE, E. An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data. **Journal of Applied Meteorology**, 1990.
- TIBA, C. et al. Brazilian Atlas of Solar Energy: Terrestrial Data Bases. v. 1, p. 59, 2000.
- VIANA, T. S. et al. Assessing the potential of concentrating solar photovoltaic generation in Brazil with satellite-derived direct normal irradiation. **Solar Energy**, v. 85, n. 3, p. 486–495, 2011.

## SHORT-TERM FORECAST OF SOLAR RADIATION IN BRAZIL USING CLOUD MOTION BASED ON SATELLITE DATA

**Abstract.** *One of the most important challenges to the future is reducing the dependence on fossil fuels, with an increasing integration and energy use of renewable resources. Some countries should reduce their emissions in next years, including Brazil. Surface solar radiation varies mainly due to the presence of cloudiness, having a major influence on the production of electricity from solar resource technologies. Due to this intermittent behavior, it is necessary to develop tools that allow the integration of power plants and support the activities of system operator, to mitigate the rapid changes in solar plant production. There are two basic approaches to forecasting solar resources. One is based on numerical weather forecasting (PNT) models, that infers the cloud formation on the site. Other approach is to project a position and impact the future of cloud cover from the estimated cloud movement of appropriate satellite applications or surface instruments. The present work aims to develop and evaluate a methodology for surface solar radiation prediction using the CMV (cloud movement prediction model). The results show that as you increase, the horizon or forecast model shows points as uncertainties of change.*

**Key words:** BRASIL-SR, Cloud Motion Vector, Solar irradiation prediction