METODOLOGIA PARA ELABORAÇÃO DE MAPAS DE RADIAÇÃO SOLAR PARA MINAS GERAIS

Chigueru Tiba – tiba@ufpe.br
Verônica Wilma – veronica_wilma@hotmail.com
Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Energias Renováveis, Centro de Tecnologias e Geociências
Ruibran Januário Reis – ruibrandosreis@gmail.com
João Francisco de Abreu, infoespa@pucminas.br
Melina Amoni Silveira Alves -geomelina@yahoo.com.br
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais–PUC Minas
Marco Aurélio Dumont - corelio@cemig.com.br
Julio Cesar Ezequiel da Costa - jcecosta@cemig.com.br
Companhia Energética de Minas Gerais - Cemig
Daniel Pereira Guimarães- daniel.guimaraes@embrapa.br
Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

Resumo. *O objetivo geral desse trabalho foi recuperar, qualificar, padronizar e disponibilizar as melhores informações solarimétricas existentes atualmente em MG, sob a forma de mapas mensais e anual. Os procedimentos utilizados para a elaboração dos mapas de irradiação solar e da insolação estão descritos. Foram construídos: mapas de localização das estações utilizadas para o mapeamento, 13 mapas da irradiação solar diária, medias mensais e anual e mapas de insolação, temperatura ambiente e precipitação associadas. O mapa da Irradiação solar global diária, média anual elaborado nesse projeto mostra que a radiação solar sobre o estado de Minas Gerais varia de 4,5 a 6,5 kWh/m^2. Os valores máximos ocorrem na região Norte de Minas Gerais e os mínimos na região Sudeste, onde se encontram as áreas de maior altitude (Serra do Caparaó e Mantiqueira) onde o regime pluviométrico é mais intenso, com totais anuais de precipitação superiores aos 1400 mm. A Região do Norte e Nordeste de MG é onde ocorrem a maior irradiação anual, 6,5 kWh/m^2, é caracterizada por um clima semi-árido com precipitações anuais entre 600-800 mm e altitudes entre 400 a 600 m. Finalmente o mapa da insolação anual mostra-se consistentemente correlacionado com a precipitação e a irradiação solar diária, media anual.*

Palavras-chave: *Energia Solar, Mapas de Irradiação Solar, Avaliação do Recurso Solar , Metodologia de Mapeamento*

1. INTRODUÇÃO

1.1 Por que da necessidade do conhecimento do Recurso solar

O conhecimento do recurso solar é importante para a reprodução ampliada e a difusão massiva do uso da energia solar para fins energéticos. A precisão do seu conhecimento espacial ou temporal permite agregar confiabilidade (menor risco) e qualidade ao sistemas solares repercutindo nos custos da energia gerada. O recurso solar é necessário para o projeto de sistemas solares em três aspectos principais:

- Estudo de localização de usinas solares (siting);
- Predição da produção anual, mensal ou diária da energia gerada e
- Previsão do desempenho temporal e estratégias operacionais.

Em estudos de localização de usinas solares de grande porte, entre outras as seguintes variáveis são ponderadas: recurso solar (global ou direta conforme a tecnologia solar a ser utilizada: fixo ou com concentração) disponibilidade de terrenos de forma não conflituosa (terras agricultu ráveis, reservas ou parque nacionais, reservas indígenas são excludentes), proximidade de acessos para transporte de equipamentos de porte ou delicados (espelhos), disponibilidade local de água de boa qualidade e proximidade de linhas de transmissão. De forma individual, o conhecimento do recurso solar é a variável de maior peso nas incertezas associadas à um projeto de sistema energético solar.

A predição da produção de energia anual, feita considerando as variabilidades estocásticas inter-anuais da radiação solar, é crucial para o cálculo do custo da energia gerada e repercute diretamente na viabilidade econômica do empreendimento.Os cálculos sazonais são importantes para traçar as estratégias operacionais e de integração do sistema energético, por exemplo, a clássica da complementaridade da energia eólica e também da energia solar com a energia hidráulica da Bacia do Rio São Francisco.Em escala de tempo mais curto (horas) subsidiar estratégias de sistemas de armazenamento.

Após a construção da usina, uma das etapas do comissionamento e aceitação da usina requer testes operacionais (pelo menos de curta duração) para verificar se a usina está dentro das especificações e parâmetros do projeto e fazer a inferência da produção anual de energia. Durante a vida da usina a radiação solar deverá ser monitorada continuamente e o desempenho deverá ser calculado simultâneamente para detectar possíveis queda de desempenho por

envelhecimento de componentes (perda de refletividade nos espelhos refletores,de vácuo nos tubos coletores ou degradação da camada de proteção de células fotovoltaicas) ou necessidade de limpeza (lavagem da superfície de espelho, módulo FV ou e tubos coletores).

1.2 Região Alvo

O estado de Minas Gerais é a quarta unidade da federação em extensão territorial, apresentando 586.528 km2, o que corresponde a 7% do território do País. O Estado está localizado entre os paralelos 14°13'58'' e 22°54'00'' de latitude Sul e os meridianos 39°51'32'' e 51°02'35'' a oeste de Greenwich.

Os dados do Censo Demográfico (IBGE, 2010) revelam que a população de Minas Gerais era de 19.597.330 em 2010, sendo que 16.715.216 pessoas residiam na área urbana e 2.882.114 na área rural. Assim, o grau de urbanização de Minas Gerais era de 85,29% em 2010. A população estadual era formada por 9.641.877 homens e 9.955.453 mulheres.

Atualmente, Minas Gerais conta com Minas Gerais possui 318 empreendimentos de geração de energia elétrica em operação, que geram 19.221.480 kW de potência. Nos próximos anos, o Estado terá uma adição de 1.435.795 kW na capacidade de geração, resultado dos 12 empreendimentos atualmente em construção e mais 72 outorgados.

A CEMIG, como principal concessionária estadual, distribui energia para 805 dos 853 Municípios mineiros, o que representa o gerenciamento de uma rede de distribuição acima de 400 mil km de extensão, considerada a maior da América Latina.

2. METODOLOGIA

2.1 Processo de mapeamento

O fluxograma para elaboração dos maps de irradiação solar e insolação para o estado de Minas Gerais estão mostradas na Fig. 1 (Tiba et al., 1999) . De forma geral, as cores mais frias representam trabalhos preparatórios ou produtos intermediários e os blocos em azul representam os produtos finais .

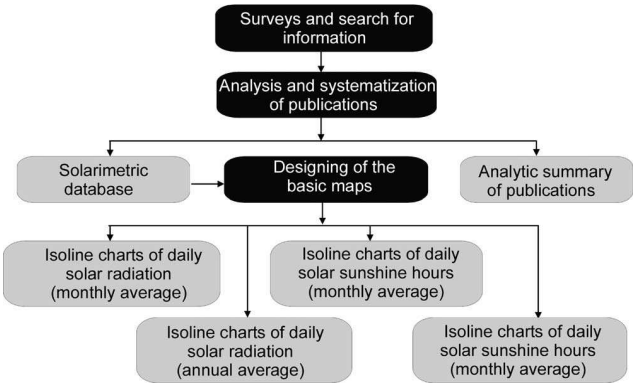


Figura 1 – Fluxograma para elaboração dos mapas de irradiação solar e insolação
Fonte: Atlas solarimétrico do Brasil, 2001

As fases de levantamento e busca de informações e análise e sistematização das informações foram as mais árduas do projeto. Constituiu-se do levantamento, localização e busca de publicações que continham dados de radiação, de insolação, mapas solarimétricos, mapas climatológicos e fitogeográficos de Minas Gerais e estados limítrofes. Tais informações encontravam-se dispersas, tanto a nível geográfico como temporal como também institucionalmente, tais como: Secretarias de Agricultura, Distritos Meteorológicos, Universidades, Instituições Energéticas, entre outras. Em função da necessidade da maior cobertura espacial e temporal possível, bases de dados com informações obtidas com sensores de diferentes classes de precisão, de distintas coberturas espaciais e períodos de medição diferentes foram consideradas, analisadas e consistidas .Essas informações foram organizadas resultando em um banco de dados.

A seguir, as informações sobre a insolação, a irradiação solar global e outras variáveis meteorológicas, foram interpoladas espacialmente e visualizadas através de mapas. Foram criados doze mapas mensais, uma anual e uma outra com a localização das estações de medição.

2.2 Coleção e Avaliação dos dados Solarimétricos

Os principais critérios para a avaliação dos dados solarimétricos foram: a qualidade dos sensores, período de medidas e a distribuição espacial das medidas.

2.2.1 Qualificação dos sensores

Os heliógrafos do tipo Campbell-Stokes, Fig. 2a, produzem informações sobre a insolação diária. Nestes equipamentos, a convergência dos raios solares sobre uma faixa de papel queima, ao longo do dia, um certo comprimento que é utilizado para quantificar as horas de brilho do Sol. A queima ocorre quando a radiação solar direta supera um limiar variável de 100 a 200 W/m^2 que depende da localização geográfica do equipamento, do clima e do tipo da faixa de papel utilizada para o registro. Quando o equipamento está adequadamente instalado, com a utilização de faixa de papel apropriado, o limiar é igual a 120 W/m^2. Mediante o uso de correlações simples, com coeficientes apropriados, as séries históricas da insolação podem ser utilizadas para estimar radiação solar diária, média mensal ou anual , com erros mínimos da ordem de 10%.

(a) (b) (c)

Figura 2 – a) Heliógrafo do tipo Campbell-Stopkes; b) piranômetro termoelétrico e c) piranômetro fotovoltaico
Fonte: Atlas solarimétrico do Brasil, 2001

Os piranômetros são equipamentos destinados a medir a radiação solar global e difusa. Existem diferentes tipos de piranômetros, porém reportaremos aqui somente os piranômetros do tipo termoelétrico e fotovoltaico, Fig. 2b e 2c, pois a maioria dos equipamentos instalados no Brasil são desse tipos. O elemento sensível do piranômetro termoelétrico é uma pilha termoelétrica (conjunto de pares termoelétricos interligados em 'série). A junção quente da termopilha encontra-se em contato com a superfície de um detetor (superfície exposta à radiação solar). Os piranômetros fotovoltaicos tem como sensor um fotodiodo porém, são de menor precisão além de terem uma resposta espectral limitada (400-1100 nm). Os piranômetros são classificados em classes conforme podem ser vistos na Tabela 1. Esses piranômetros acoplados a integradores eletrônicos, em configuração de rede de medição, realizam medidas da radiação solar global diária com erros apresentados Tabela 1, desde que todos os procedimentos de manutenção e calibração periódica (no mínimo 1 vez por ano) sejam seguidos. A grande maioria dos instrumentos utilizados para medição em campo no Brasil tem sido de segunda classe (fotovoltaicos).

Tabela 1- Classificação dos sensores piranométricos conforme WMO

Características	Padrão Secundário	Primeira Classe	Segunda classe[c]
Tempo de resposta (95%)	<15 s	< 30 s	< 60 s
Off-Set Resposta para 200W/m^2 de radiação térmica Resposta para 5K/h de mudança na temperatura ambiente	 7 W/m^2 2 W/m^2	 15 W/m^2 4 W/m^2	 30 W/m^2 8 W/m^2
Resolução	1 W/m^2	5 W/m^2	10 W/m^2
Estabilidade (Mudança anual em % da escala plena)	0.8	1.5	3.0
Resposta direcional (efeito cosseno)	10 W/m^2	20 W/m^2	30 W/m^2
Resposta a temperatura (Erro máximo % devido a variação abrupta no intervalo de 50K)	2	4	8
Não linearidade (desvio % , em relação à resposta para uma irradiação de 500 W/m^2 , para uma variação na irradiação no intervalo de 100 a 1000 W/m^2)	0.5	1.0	3.0
Sensibilidade espectral (desvio % em relação à média dentro do intervalo de 300 a 3000 nm)	2.0	5.0	10.0
Resposta à inclinação (desvio % da resposta a 0º, plano horizontal, devido a variação de 0º a 90º a 1000 W/m^2)	0.5	2.0	5.0

Precisão (95% de confiança)			
Total horário	3%	8%	20%
Total diário	2%	5%	10%

Fonte: WMO, 2010

2.2.2 Período de Medidas

Um problema central associado à avaliação do recurso solar, consiste em estimar o menor número de anos necessário para se obter uma estimativa confiável da radiação solar em determinado lugar. Trabalhos realizados (Vernich e Zuanni, 1996) com o propósito de utilizar medidas de insolação (horas de brilho de Sol) para determinar a radiação solar global, através da relação de Angstrom, estimaram o número de anos necessários para uma determinação confiável do recurso solar. Os autores concluem que um período de 14 anos fornece uma série diária estatisticamente estável, não somente para dados de insolação e sua conversão em radiação, mas também para outras grandezas meteorológicas. Em outras palavras, para períodos maiores que 14 anos pode-se acreditar que a variabilidade observada, neste caso do recurso solar, deve-se exclusivamente a sua natureza estatística intrínseca, independentemente do tamanho da amostra. Obviamente, em regiões geográficas de climatologias fortemente variáveis a consideração anterior não é válida.

2.2.3 Distribuição espacial das medidas

De forma geral as informações solarimétricas, até as mais abundantes como a insolação diária, não satisfazem todas as necessidades dos usuários devido à baixa densidade da rede de estações. Estudos recentes sobre a variabilidade espacial do recurso solar, em regiões fito-geográficas homogêneas, mostram que a radiação diária global, média mensal, pode ser extrapolada até 200 Km de distância com erros da ordem de 15%, com um nível de confiança de 90% (Grossi Gallegos e Lopardo, 1988). Em regiões geográficas de relevos fortemente variáveis como montanhas e espelhos de água muito grandes (costa) a extrapolação acima não é válida. O tema da extrapolação espacial da radiação solar ainda é insuficientemente estudado, seja pela falta de dados de boa qualidade, seja pela variedade dos locais pesquisados. Portanto, e apesar de sua conhecida limitação, o critério para qualificação da distribuição espacial terá como referência a possibilidade mencionada acima.

2.2.4 Relação de Angstrom

A relação entre a insolação diária e a radiação solar global diária, média mensal, é a conhecida relação de Angstrom (1924). A expressão sofreu modificações e atualmente é expressa da seguinte forma:

$$\mathbf{H/H_o = a + b(n/N)}$$

onde, **H e H_o** são, respectivamente, a radiação solar global diária e a radiação solar global diária no topo da atmosfera, médias mensais **; n e N** são a insolação diária e a duração astronômica do dia , médias mensais. Existe uma extensa lista de trabalhos relativamente recentes, que procuram: obter melhores coeficientes de regressão **a** e **b,** com inclusão de termos não lineares ou de outras variáveis como umidade relativa, quantidade de água precipitável, latitude e altura solar , entre outros . A conclusão é que a melhoria nos resultados obtidos com a relação de Angstrom é modesta e insuficiente para justificar o aumento na complexidade dos cálculos.

2.2.5 Estimação mediante imagens de satélites

Uma alternativa interessante é a estimação feita mediante imagens de satélites por que é capaz de cobrir larga extensão espacial e razoável extensão temporal. A utilização dessa metodologia porém necessita de estações solarimétricas terrestres de alta qualidade para a sua calibração. Além disso, além os sensores instalados nos satélites também sofrem da derivas (descalibração com o tempo) e normalmente seria necessário um astronauta e equipamentos associados para sua recalibração, o que normalmente não é feito por problemas de custos.

2.2.6 Qualificação dos dados solarimétricos medidos para uma localidade

Em conformidade com os comentários anteriores a respeito dos diversos aspectos referentes a medidas solarimétricas , a qualificação dos dados solarimétricos para uma dada localidade, obedece a seguinte hierarquização:

i) Dados piranométricos com sensores de primeira classe
ii) Dados piranométricos com sensores de segunda classe
iii) Estimativas da radiação solar utilizando a relação de Angstrom

Se existirem informações com equipamentos iguais e comprimentos desiguais da série histórica de dados, prevalece a série mais longa. Também nesse processo é necessário ressaltar o caráter artesanal da qualificação de bases de dados (sempre com problemas de falhas temporal, espacial ou de calibração, entre outros), onde a apreciação do pesquisador com longa experiência acumulada no tema é muito importante.

3. BANCO DE DADOS IDENTIFICADOS

Os seguintes Bancos de dados foram identificados e recuperados para o estado de Minas Gerais:

- B1 - Banco de Dados de irradiação solar global e outras variáveis meteorológicas medidos com estações automáticas para o período 2008 até a data atual, em escala horária,medido pelo INMET(2010);
- B2 - Banco de Dados de irradiação solar global e outras variáveis meteorológicas medidos com estações automáticas para o período 1993 até a data atual, em escala diária,medido pelo INMET
- B3 -Banco de Dados de irradiação solar global e outras variáveis meteorológicas medidos com estações automáticas para o período de 1998 a data atual, em escala diária , medido pelo INPE-CPTEC(2010);
- B4 -Banco de dados de irradiação solar global diária, média mensal, medidos com piranômetros termoelétricos para o período 1984 -1985; pelo CEMIG(1987);
- B5 Banco de dados de irradiação solar global diária, para o período 1984 -1985; sem identificação do sensor , pela CEMIG;
- B6 – Insolação diária, média mensal, medidos com heliógrafos Campbell –Stokes no período 1960-2010 (INMET,2010)
- B7 – Atlas solarimétrico do Brasil (Tiba et al., 1999), com compilação dos dados terrestres até 1995 para todo Brasil, feito pelo CEPEL-UFPE.CHESF;
- B8 - Atlas de Irradiação solar para o Brasil estimado mediante imagens de satélites, pelo CPTEC em 2005,(Colle e Pereira, 1998).

4. INTERPOLAÇÃO ESPACIAL (GRIDDING) E MAPA DE CONTORNO

4.1 Interpolação Espacial

Interpolação é um método utilizado para gerar novos dados baseando-se em um conjunto discreto de dados conhecidos. Estes dados conhecidos previamente são obtidos através da coleta de dados
ou de experimentação. Em uma definição mais técnica, pode-se dizer que a interpolação é um tipo de Ajuste de Curva que permite determinar uma função que represente os dados da amostra, possibilitando a estimativa de novos dados. Como a função gerada através da interpolação é uma versão simplificada da função original do problema, pois está baseada em uma amostra dos dados, ela possui um percentual de erro e um custo de acordo com o método de interpolação utilizado.

Segundo Burrough e McDonnell (1998), um conceito mais geográfico de interpolação se refere ao nome dado ao processo de estimar valores de atributos de determinados locais baseando--se nas medições de outros locais da mesma área ou região. Esta estimativas dos demais pontos de uma área baseando-se em uma amostra é um procedimento matemático que depende da quantidade de pontos na amostra e do objetivo da interpolação. Neste processo são utilizados os valores colhidos em determinados pontos da área estudada, sendo que os pontos que estão mais próximos têm maior chance de terem valores iguais do que pontos que estão distantes uns dos outros, conforme a Primeira Lei de Geografia, proposta por Waldo Tobler (Abreu, 2003) Desta forma, os diversos métodos de interpolação utilizam a informação de alguns pontos para calcular os pontos vizinhos e chegar a uma superfície contínua estimada.

Neste trabalho, o método de Interpolação “Kriging” foi utilizado. A interpolação “kriging”, também conhecida por “krigagem” ou “Processo Gaussiano de Regressão”, é um método geoestatístico de regressão utilizado para aproximar ou interpolar dados. A “krigagem” também pode ser definida como uma forma de predição linear ou de inferência bayesiana. Este método, que era utilizado na área de mineração, é bastante poderoso e foi desenvolvido pelo matemático francês Georges Matheron a partir dos trabalhos de seu inventor, o engenheiro de minas sul africano Daniel G. Krige.

Esta técnica assume que os dados de uma determinada população se encontram correlacionados no espaço, ou seja, se num ponto o peso ou massa é igual a x, é muito provável que se encontrem
resultados muito próximos de x quanto mais próximos se estiver do ponto p. Pode-se dizer que a “krigagem” assume que a variável que está sendo interpolada é uma variável regionalizada, ou seja, possuem certo grau de correlação espacial.

4.2 Mapa de Contorno

Segundo Watson (1992), o processo de geração do mapa de contorno, chamado de Contouring, está condicionado à representação de uma determinada superfície, a qual está relacionada com um conjunto de dados. A natureza destes dados pode ser topográfico ou quaisquer outros dados que representam a ocorrência de um fenômeno no espaço. Os mapas de contorno são, geralmente, gerados através da variação de uma função bivariada que gera uma superfície contí nua em três dimensões no espaço. Nos casos em que os valores da função são conhecidos apenas em algumas localidades, são utilizados métodos de interpolação para estimar o comportamento do fenômeno em uma região (Tobler, 1979). As superfícies contínuas podem ser representadas por modelos de linhas de contorno ou por grids, que podem ser regulares ou irregulares (Comber; Proctor; Anthony, 2007). As linhas de contorno, chamadas de isolinhas ou isoplets, são linhas curvilíneas traçadas por pontos de igual valor.. Mesmo que os dados representados nas superfíes contínuas nuas possuam três dimensões (duas dimensões da localização no espaço e uma dimensão que representa o atributo da localização) eles são representados apenas por duas dimensões nos mapas de contorno, já que a terceira dimensão é representada pelas cores ou pelas isolinhas.

5. FILTRAGEM

Os bancos de dados identificados e recuperados descritos anteriormente foram analisados e filtrados. O procedimento de filtragem inclui a observação manual dos dados e das condições das estações (ao longo do tempo) por experientes especialistas mineiros em meteorologia. Após os procedimentos de filtragem os seguintes dados foram selecionados para a confecção dos mapas de irradiação solar e insolação:

- 49 estações do Banco de dados B1 (INMET-2008 – 2010), medido em escala horária, por ser uma rede bem distribuída e recente e por isso provavelmente ainda calibrada;
- 31 estações do Banco de Dados B2 (INPE-2008-2010) de irradiação solar global e outras variáveis meteorológicas medidos com estações automáticas para o período 2008-2010, pelo INPE. Para aumentar a densidade das estações consideradas e assegurar a continuidade espacial com estados limítrofes: 12 interno a MG e 19 em estados limítrofes;
- 06 estações do Banco de Dados B3 (CEMIG-2008-2010) de irradiação solar global e outras variáveis meteorológicas medidos com estações automáticas, em escala diária , medidas pelo CEMIG (apenas uma parte, na medida em que pela experiência acumulada dos meteorologistas algumas não eram confiáveis , por exemplo pela mudança de local.
- Banco de dados B6 (INMET – 1960-2010) de Insolação diária, média mensal, medidos com heliógrafos Campbell –Stokes no período 1960-2010. Mesmo com muitas falhas principalmente em tempos mais recentes é única com tal abrangência temporal e espacial.

O Banco de dados B4 (CEMIG – 1984-1985) de dados de irradiação solar global diária, média mensal, embora medidos com piranômetros termoelétricos foi descartado pelos seguintes motivos : muito antiga, série temporal curta e relativamente baixa cobertura espacial.

Os “outliers” foram identificados mediante o treinamento de uma rede neural artificial para estabelecer as relações funcionais entre as radiações mensais e variáveis espaciais (latitude, longitude e altitude). Foram considerados outliers os dados de radiação com uma variação inter-anual acima de 15%. Então os dados originais foram substituidos pelos estimados apenas no caso de existência desses “outliers!”.

A Fig. 3 mostra as estações solarimétricas utilizadas na elaboração dos mapas de isolinhas de irradiação solar (a esquerda) e insolação (a direita).

6. CRITÉRIOS GERAIS PARA ELABORAÇÃO DOS MAPAS

Para elaboração das cartas solarimétricas os seguintes critérios gerais, foram seguidos:

i) Considerando que os erros associados às medidas com piranômetros fotovoltaicos (sensores de segunda classe conforme OMM) acoplados aos integradores eletrônicos que operam com erros de calibração de 5% e com derivas de 2% ao ano e sem registros de recalibração é realista admitir um erro do campo de medição da ordem de 10-15%. O índice inferior é para um rede com boa manutenção e calibragem com freqüência de 24 meses;

ii) Foram levados em consideração valores médios da radiação solar obtidos em estados limítrofes;

iii) Foram utilizadas, como apoio complementar, as Cartas Pluviométricas do Estado de MG e o mapas de cobertura vegetal;

iv) Os valores da radiação solar global diária, médias mensais e anual foram expressos em kWh/m^2.dia, unidade usual ao setor da energia elétrica;

v) Como não era conhecida a qualidade dos dados de insolação obtidos com heliógrafos do tipo Campbell-Stokes, admitiu-se " a priori" uma confiabilidade igual para todos, considerando um erro não inferior a 15%.

Como conseqüência das considerações acima, foi estabelecido como espaçamento adequado, entre isolinhas sucessivas, o valor aproximado de 0,5kWh/**m^2.dia**. Esse valor corresponde ao erro instrumental de 10%. Da mesma forma o espaçamento entre isolinhas das insolações foi fixado em **uma hora/dia**.

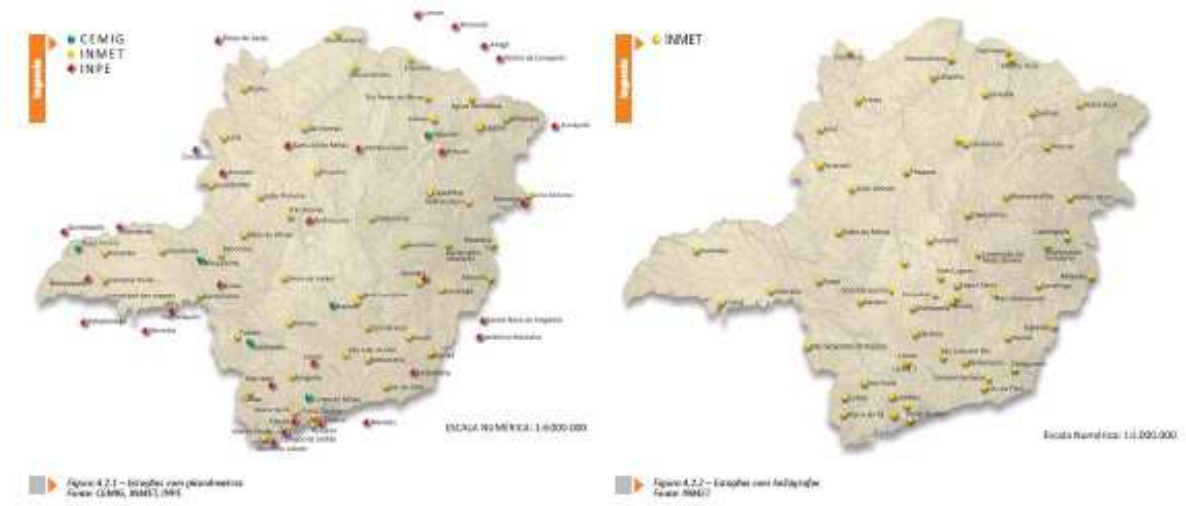


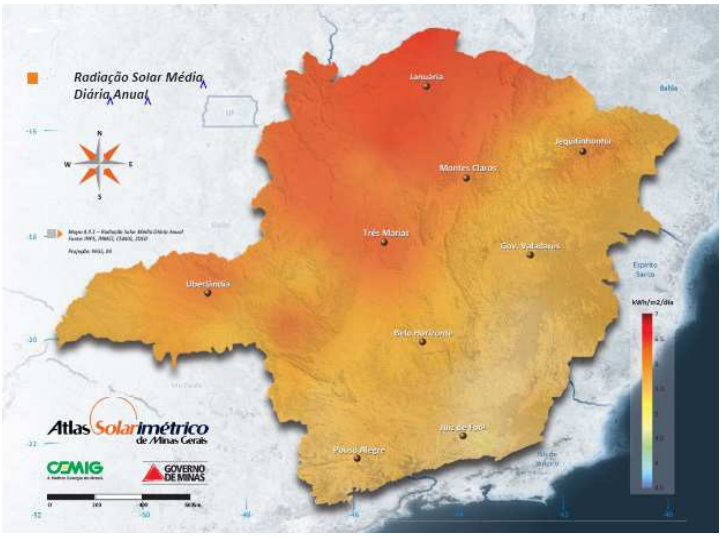
Figura 3 – Localização das estações solarimétricas utilizadas na elaboração dos mapas de isolinhas de irradiação solar (a esquerda) e insolação (a direita).

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

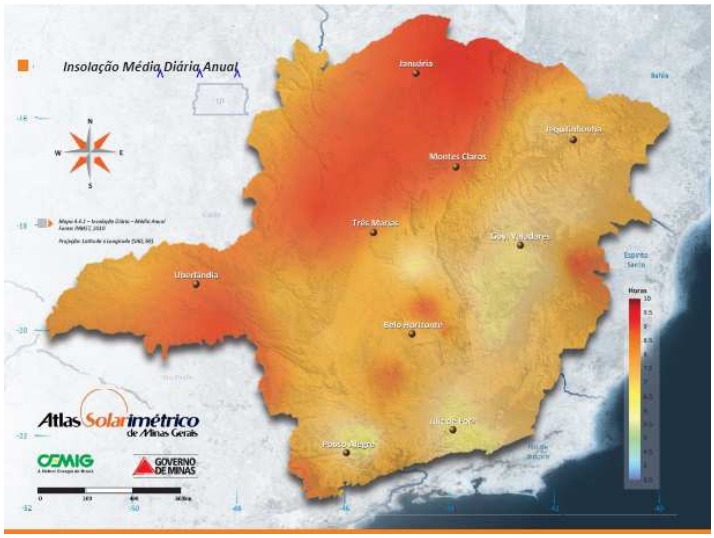
O mapa da Irradiação solar global diária, média anual, Fig. 4a, elaborado nesse projeto mostra que a radiação solar sobre o estado de Minas Gerais varia de 4,5 a 6,5 kWh/m2. Os valores máximos ocorrem na região Norte de Minas Gerais e os mínimos na região Sudeste, onde se encontram as áreas de maior altitude (Serra do Caparaó e Mantiqueira) onde o regime pluviométrico é mais intenso, com totais anuais de precipitação superiores aos 1400 mm, Fig. 4c. A massa de ar tropical marítima que atua entre o Brasil e a África é o principal fator climático que inibe a formação de nuvens e, conseqüentemente, a ocorrência de chuvas nas regiões nas regiões Norte e Nordeste. As regiões Norte e Nordeste de Minas Gerais são caracterizadas por um clima semi-arido com precipitações anuais entre 600-800 mm e altitudes entre 400 a 600 m. O mapa da insolação, Fig. 4b, está consistentemente correlacionado com a precipitação e a irradiação solar diária, media anual.

As cartas de radiação solar mensal, não mostradas aqui por falta de espaço mas, que podem ser vistas em detalhes em (Tiba et al., 2012), demonstraram claramente para cada mês, regiões bem diferenciadas e razoavelmente correlacionadas com as condições pluviométricas e horas de insolação correspondentes. As cartas de radiação solar global diária, médias mensais , mostraram que a radiação solar em Minas Gerais varia entre 3,0 a 7,5 kWh/m^2, com um período de mínimo no trimestre maio-junho-julho, onde as estações solarimétricas registram intensidade de radiação na faixa de 3 a 4 kWh/m^2. Verifica-se também neste trimestre que o centro de máxima (5 kWh/m^2) ocorre sobre uma vasta região compreendida no Noroeste de Minas Gerais. A tendência de mínima (3 kWh/m^2) ocorre ao Sul e Sudeste (na região de Caparaó) de Minas. Já no trimestre dezembro-Janeiro-Fevereiro, observa-se que as estações solarimétricas registram intensidades de radiação muito alto, atingindo um valor máximo de 7,5 kWh/m^2. Neste período ocorre um centro de máxima de 7,5 kWh/m^2 em uma região pequena do Noroeste de Minas Gerais, na região situada ao norte de Januária. Valores menores porém ainda assim expressivos (muito bons), entre 6,0 e 7,0 kWh/m^2,ocorrem em uma vasta região localizado acima do paralelo 18 (metade superior de Minas Gerais). Também pode ser deduzido das cartas de isolinhas de radiação solar mensais que os menores índices de nebulosidade (maior índice de radiação solar) se concentram nas regiões Leste e Zona da Mata, onde a circulação marítima deixa o tempo parcialmente nublado em quase todos os dias do ano.

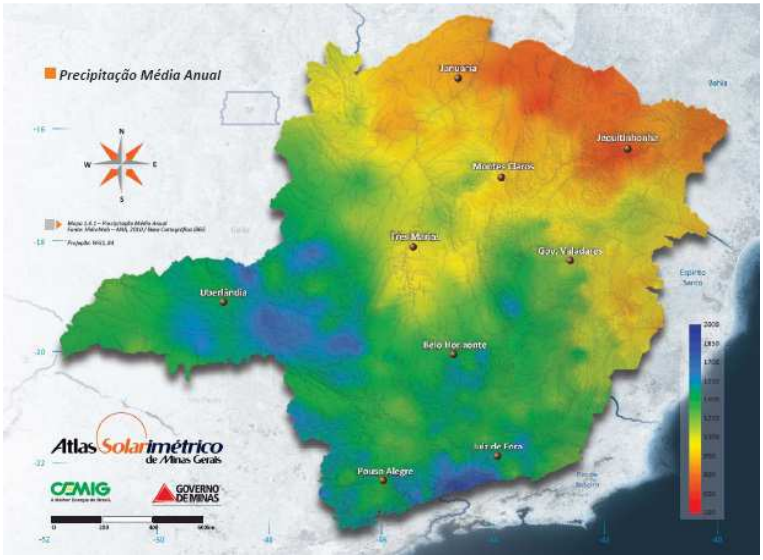
Os mapas sazonais da insolação, também estão consistentemente correlacionados com a precipitação. No inverno (junho a agosto), quando o índice de precipitação é o menor do ano, o número de horas de brilho solar atinge os valores máximos entre 8,5 a 9,5 horas em uma vasta região da metade oriental do estado de Minas Gerais. De forma inversa, para o período de novembro a janeiro ocorre um máximo anual de precipitação, e portanto um mínimo de horas de brilho solar, entre 5,0 e 6,0 horas por dia.



(a)



(b)



(c)

Figura 4 – a) Irradiação solar diária média anual, b) Insolação diária média anual e c) precipitação média anual para Minas Gerais

Em resumo, as cartas de isolinhas da radiação solar global diária, médias mensais e anual, descrevem de forma adequada os dados disponíveis em MG. Considerando as características das informações existentes, as cartas preparadas constituem o conjunto mais atualizado e de melhor qualidade elaborado sobre o recurso solar em Minas Gerais.

As regiões desérticas do mundo são as mais bem dotadas de recurso solar. Assim a região da cidade de Dongola, localizada no Deserto Arábico, no Sudão, e a região de Dagget no Deserto de Mojave, Califórnia, Estados Unidos, são exemplos de localidades excepcionalmente bem servidas de radiação solar. Para efeito de comparação, são mostradas na Tabela 2, os valores da radiação solar diária, médias mensais , máximas, mínimas e anuais para estas duas localidades e algumas outras do Brasil e particularmente algumas de MG. Como pode ser visto nessa tabela, as áreas localizadas no Noroeste de MG (microregiões de Pirapora, Januária, Montes Claro e Janaúba), Fig. 5, têm valores da radiação solar diária, média anual comparáveis às melhores regiões do mundo, como por exemplo, Dagget. Além disso, as variações sazonais para Noroeste de MG são menores, o que poderá resultar em importantes vantagens técnicas e econômicas dos sistemas solares instalados nessas região.

Tabela 2 – Comparação dos dados de radiação solar diária, médias mensais para diversas localidades do Mundo e do Brasil

Localidade	Latitude	$H_{h(mínimo)}$ (kWh/m^2)	$H_{h(máximo)}$ (kWh/m^2)	$H_{h(anual)}$ (kWh/m^2)	$H_{h(max.)}/H_{h(min.)}$
Dongola-Sudão	19^0 10$'$	5.3(Dez)	7,7(Mai)	6,6	1,4
Dagget - USA	**34^0 52$'$**	**2,2(Dez)**	**8,7(Jun)**	**5,8**	**4,0**
Belém-PA-Brasil	1^0 27’	3,9(Fev)	5,5(Ago)	4,9	1,4
Floriano -PI-Brasil	6^0 46$'$	4,7(Fev)	6,2(Set)	5,5	1,3
Petrolina-PE-Brasil	9^0 23$'$	4,5(Jun)	6,3(Out)	5,5	1,4
B. J, da Lapa -BA-Brasil	13^0 15$'$	4,4(Jun)	5,9(Out)	5,5	1,3
Cuiabá-MT-Brasil	15^0 33’	4,1(Jun)	5,6(Out)	5,0	1,4
Montalvânia - MG	**14^0 25’**	**5,1(Abr)**	**7,1(Jan)**	**6,1**	**1,4**
Espinosa–MG	**14^0 55’**	**4,8(Jun)**	**6,9(Jan)**	**5,8**	**1,4**
Mocambinho–MG	**15^0 03’**	**4,9(Jun)**	**6,8(Fev)**	**5,8**	**1,4**
São Romão – MG	**16^0 22’**	**5,0(Jun)**	**6,8(Fev)**	**5,9**	**1,4**
B. Horizonte-MG-Brasil	19^0 53’	4,1(Jun)	5,5(Fev)	5,0	1,4
P. Alegre-RS-Brasil	30^0 1’	2,3(Jun)	6,1(Dez)	4,2	2,7

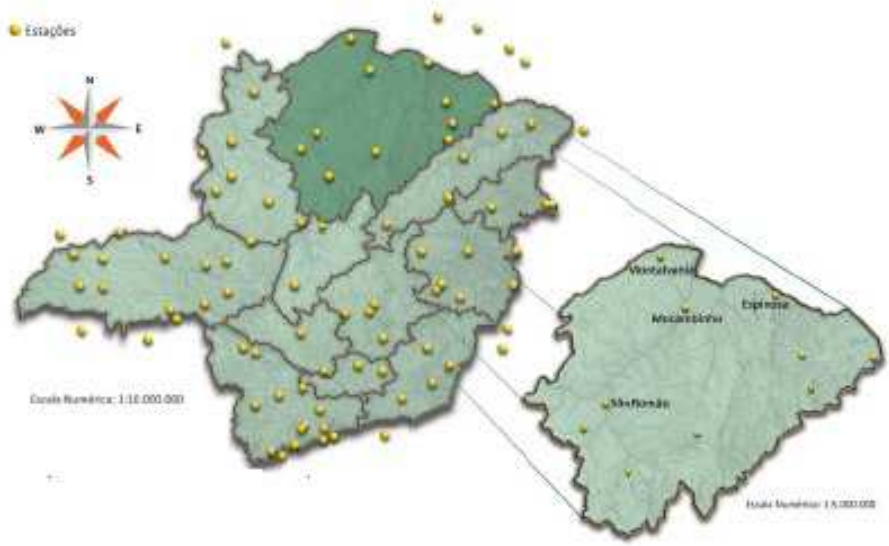


Figura 5 – Localização das estações de medições com maiores níveis de irradiação solar no Noroeste de MG

Finalmente convém ressaltar os seguintes aspectos importantíssimo para os usuários de informações sobre o recurso solar :

i) As cartas de distribuição espacial de radiação solar diária, representam apenas uma primeira aproximação do campo de distribuição da energia solar disponível na superfície (observação espacial macro). Para informações locais deve-se recorrer às médidas numéricas das respectivas estações solarimétricas;

ii) O mapa de isolinhas de insolação diária e a sua eventual conversão para radiação solar poderia tornar-se em valiosa informação complementar dos mapas e banco de dados da radiação solar e

iii) A escolha de local para instalar um sistema ou um conjunto de sistemas solares, mediante o uso de mapas de isolinhas de irradiação construído aqui, (porque o valor médio do recurso solar parece adequado) tem um caráter indicativo preliminar que ressalta o potencial da região. Uma escolha definitiva necessitará de medidas detalhadas do recurso solar no local para determinar seu valor e principalmente a sua variabilidade temporal.

Agradecimentos

Agradecemos a CEMIG (Centrais Elétricas de Minas Gerais), ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e ao Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq), pelo apoio as pesquisas em energia solar, particularmente a respeito da medição, avaliação, modelagem e mapeamento da radiação solar.

REFERÊNCIAS

Abreu, J.F.; Barroso, L.C. Geografia, modelos de análise espacial e GIS. Belo Horizonte: Pontífcia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas), 2003.

Angstrom, A. *Solar and terrestrial radia on*. Quart. J. Roy. Met. Soc. 50, p. 121-126, 1924.

Burrough, P. A; Mcdonnell, R. . Principles of geographical information systems. New York: Oxford University Press, p. 333, 1998.

CEMIG, (1987) Estudos sobre Aproveitamento de Energias Solar e Eólica em Minas Gerais, Depto de Tecnologia de Engenharia, 01.000-TN/TE-093, Relatório Técnico de Projeto.

Colle, S.; Pereira, E. B. (1998) Atlas de Irradiação Solar do Brasil - Primeira versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície Edição. Florianópolis: LABSOLAR / NCTS, 1998, p. 79-104.

Comber, Alexis; Proctor, Chris; Anthony, Steve. A combined pycnophylactic dasymetric method for disaggregating spatial data: the example of agricultural land use. In: Proceedings of the Geographical Information Science Research UK Conference. National Centre for Geocomputation. National University of Ireland: Maynooth, p. 445-450, 2007.

Grossi Gallegos H. and Lopardo, R. Spatial variability of the global solar radiation obtained by the Solarimetric Network in the Argentine Pampa Humeda. Solar Energy, vol. 40, n. 5, p. 397-404, 1988.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílio (PNAD), Brasília/DF, 2009-2010.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Brasília/DF, 1961-1990 e 2009-2010.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Brasília/DF, 2008-2010.

Tiba et al. Atlas Solarimétrico do Brasil – Banco de dados Terrestres. Pernambuco: Editora Universitária de Pernambuco, 2001.

Tiba, C , Reis, R. et al., Solarimetric Atlas for Minas Gerais, 2012, First Edition, 80pp, ISBN 978-85-87929-50-1

Tiba, C., Grossi Gallegos, H., Fraidenraich, N. e Lyra F.J.M, On the development of spatial:temporal solar radiation maps a Brazilian case study, Renewable Energy Vol. 18, 393-408, 1999.

Tobler, W. R. Smooth pycnophylactic interpolation for geographical regions. Journal of the American Statistical Association n. 74, p. 519-536, 1979.

Vernich, L. and Zuanni, F., About the minimum number of the years required to stabilize the solar irradiation statistical estimates. Solar Energy, vol. 57, n. 6, p. 445-447, 1996.

Watson, David F. Contouring: a guide to the analysis and display of spatial data: with programs on disket e. Oxford: Pergamon, p. 321, 1992.

ON THE DEVELOPMENT OF SPATIAL/TEMPORAL SOLAR RADIATION MAPS: A MINAS GERAIS (BRAZILIAN) CASE STUDY

Abstract. *The daily, annual average global solar radiation chart show that solar radiation in Minas Gerais varies for 4.5 and 6.5 kWh/m2. The maximum values, 6.5 kWh/m2, occur in the north and northeast region of Minas Gerais, characterized by a semiarid climate with annual rainfall between 600-800 mm and altitudes between 400-600 m. The minimum occurs in the Southeast (Mantiqueira and Serra do Caparaó) where the rainfall is more intense, with total annual rainfall greater than 1400 mm. The isoline charts of daily, monthly and annual average global solar irradiation describe the data available in Minas Gerais appropriately. Considering the characteristics of the existing information, the charts prepared constitute the most up-to-date and highest-quality set ever elaborated on solar resource in Minas Gerais. The monthly solar radiation charts clearly show, differenciated regions that reasonably correlated with the pluviometric condition and the corresponding hours of insolation.*

.

Key words*:* Solar Energy, Solar Radiation Maps, Solar Resource Assessment, Mapping Methodology