

CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM MÉTODO DE MEDIDA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL POR MEIO DE ACTINÓGRAFOS BASEADA EM TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS

A. Dal Pai¹, I. G. Queiroz², D. Rodrigues³, D. Martins⁴, R. F. Sgoti⁵

^{1,2,5}Faculdade Tecnologia de Botucatu –FATEC. Av José Ítalo Bacchi, s/n. CEP 18606-855. Botucatu/SP/Brasil. Tel +55143814-3004. E-mail: adalpai@fatecbt.edu.br

^{3,4}Departamento de Recursos Naturais /FCA/UNESP. Botucatu/SP/Brasil.

Recibido: 06/08/12; Aceptado: 04/10/12

Resumo: O objetivo do trabalho é desenvolver um sistema informático de digitalização e processamento de actinogramas baseado em técnicas de Processamento de Imagens Digitais e comparar com o sistema tradicional de medidas. Os actinogramas foram fornecidos pela Estação Meteorológica de Botucatu (FCA/UNESP). As análises preliminares indicam um desempenho satisfatório do software proposto, gerando medidas na mesma ordem de grandeza do método de referência para partição diária. O software proposto pertence a um projeto que se encontra ainda em andamento, onde rotinas de técnicas diversas continuam sendo implementadas no reconhecimento da curva de interesse para melhorar a qualidade do processamento das informações gráficas dos actinogramas. Os actinogramas estão em fase de digitalização para que o software possa ser testado com uma base de dados mais consistente, onde poderão ser identificados tendências temporais dos dados resultantes da aplicação das técnicas de Processamento de Imagens Digitais no monitoramento da radiação solar por actinógrafos.

Palavras-chave: radiação solar, actinógrafo, digitalização, sistema informático.

INTRODUÇÃO

A radiação solar apresenta interação com os constituintes atmosféricos por meio dos processos de absorção, reflexão e difusão, os quais atenuam a radiação incidente e podem mudar os níveis energéticos disponíveis em superfície. A atividade industrial tem depositado toneladas de materiais particulados na atmosfera, provocando alterações nas propriedades óticas das nuvens, além de promover a diminuição da radiação solar incidente em superfície via absorção e espalhamento (Lara et al., 2005). Assim, as mudanças energéticas em superfície têm impacto direto na dinâmica do clima.

Com a introdução de aparelhos mais modernos de medidas, o monitoramento ambiental (aquisição e armazenamento) tornou-se automático e digital. No entanto, muitas estações meteorológicas no Brasil foram montadas em meados do século 20 com investimento limitado e aparelhos mecânicos-analógicos. As medidas ainda são realizadas de forma manual, podendo acarretar erros devido à complexidade e subjetividade na observação da medida. O monitoramento da radiação solar, na maioria das estações meteorológicas do Brasil, é realizado, a muitas décadas, por meio de um aparelho denominado actinógrafo. Esse aparelho consiste de duas placas de metais diferentes que apresentam dilatações diferentes para o mesmo ganho energético. A diferença de dilatação é registrada em um papel quadriculado (actinograma), onde cada quadrado tem um valor energético constante expresso em J/m². Ao final do dia, esse papel é recolhido e um funcionário habilitado conta o número de quadrados sob a curva desenhada e, por meio de uma regra de proporcionalidade, é estimada a quantidade de radiação solar. Essa medida é mais comum na partição diária em função de dificuldades operacionais para partições de tempo menor. Portanto, como a coleta e o processamento das informações contidas nos gráficos são feitos de forma manual, interpretações subjetivas devido à falta de treinamento ou a rotinas de coletas diferentes por observadores distintos podem induzir a uma sistemática de erros. Como há várias estações meteorológicas no Brasil e no mundo, a coleta de dados pode não ser uniforme, ficando a cargo de cada unidade de medição os critérios de interpretação e coleta. Nesse sentido, os resultados produzidos podem ser inconsistentes devido à falta de padronização no processo de coleta, afetando diretamente a formação de uma base de dados de qualidade.

Com a modernização dos sistemas informáticos de hardware e software, os actinogramas poderão ser digitalizados e processados por técnicas baseadas na teoria de Processamento de Imagens Digitais (PID), garantindo padronização no processo de coleta e de interpretação dos valores. O uso de rotinas e filtros específicos garantirão uniformidade na medida, minimizando erros de leitura, otimizando tempo e evitando prejuízos (Paine e Lodwick, 1989; Wang et al., 2008). Outro aspecto positivo da implantação de um sistema digital de coleta e interpretação dos gráficos é a formação de bancos de dados

¹Prof. Associado II da Faculdade de Tecnologia de Botucatu (FATEC).

²Graduando em Informática para Negócios da Faculdade de Tecnologia de Botucatu (FATEC).

³Técnico especializado do Departamento de Recursos Naturais/FCA/UNESP.

⁴Prof. Doutor do Departamento de Recursos Naturais /FCA/UNESP.

⁵Prof. Assistente II da Faculdade de Tecnologia de Botucatu (FATEC).

em partições de tempo menor, como o caso da partição horária. Nesse sentido, o banco de dados horário poderá recuperar informações da distribuição solar ao longo das horas, servindo de estudo para perfis de distribuição de nuvens, aerossóis e poluentes em comparação com os níveis atuais. Um banco de dados horário poderá contribuir de forma significativa para melhor caracterização do potencial solar de uma região, além de fornecer subsídios para estudos da evolução do efeito estufa, responsável pelo aquecimento global. A flexibilidade das modernas linguagens de programação permitirão ao sistema a inserção de módulos específicos para outros aparelhos registradores como anemógrafos (velocidade e direção do vento), heliógrafos (brilho solar), pluviógrafos (precipitação) e termohigrógrafos (temperatura e umidade do ar) modernizando e otimizando a rotina de trabalho de uma estação meteorológica (Dal Pai et al., 2010).

O objetivo do trabalho é desenvolver um sistema informático de digitalização e processamento de actinogramas baseado em técnicas de Processamento de Imagens Digitais para a partição de tempo diária e horária.

MATERIAL E MÉTODOS

Instrumentação

O “Sistema de digitalização e processamento de informações gráficas da radiação solar global monitorada por actinógrafos” está sendo desenvolvido na Faculdade de Tecnologia de Botucatu (FATEC-BT). Os cartões grafados do actinógrafo referentes às medições de radiação solar foram cedidos pela Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP (Botucatu), a qual mantém um banco de dados registrado em formato de papel, sobre o qual será realizada a calibração e a validação do sistema proposto. O período fornecido para o estudo foi o ano de 2011. A estação meteorológica da UNESP está localizada nas coordenadas geográficas 22,85S de latitude, 48,45W de longitude e 786m de altitude.

O aparelho utilizado para medir a radiação solar global incidente é o actinógrafo (Fig. 1a). Este aparelho consiste em duas placas metálicas de materiais diferentes que, quando submetidos à mesma energia, dilatam de forma diferenciada. A diferença de dilatação entre as placas é registrada num cartão fixo num eixo girante, calibrado para realizar o percurso de uma volta por dia. A dificuldade dos observadores meteorológicos para realização desta medida é a contagem dos quadrados sob a curva traçada que representa o total de radiação solar global incidente. Os quadrados são pequenos e se o volume de dias é grande, a indução ao erro devido a tarefa repetitiva é praticamente certa. A Fig. 1b apresenta um trecho do papel milimetrado utilizado na medida da radiação solar. Para calibração e validação, a radiação solar global de referência foi medida por um piranômetro Eppley modelo PSP acoplado a um sistema de aquisição de dados automático datalogger modelo 23X da Campbell Scientific, Inc.

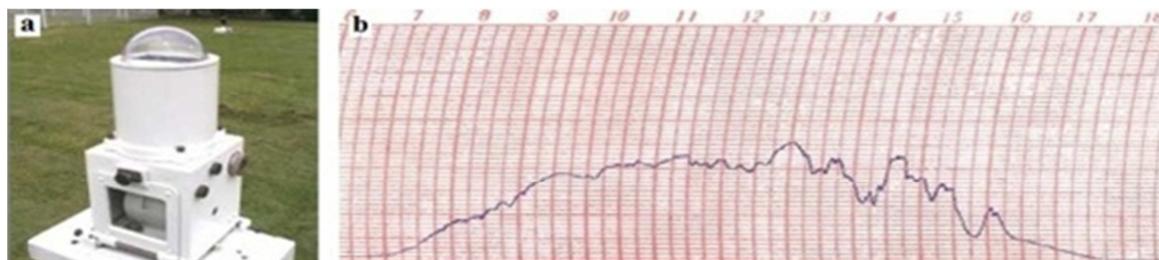


Figura 1: (a) Actinógrafo usado para medir a radiação solar global; (b) Papel utilizado no registro da radiação solar pelo actinógrafo (actinograma).

Sistema Proposto

O sistema proposto está sendo implementado por meio de um software na linguagem Pascal orientada à objeto, da plataforma Delphi. Com a linguagem orientada à objeto é possível criar uma interface visual simples, onde o usuário pode realizar a captura e o processamento das imagens de forma rápida e precisa. O funcionamento do sistema consiste em um reconhecimento e reforço da curva traçada pelo actinógrafo, destaque da área sob a curva que representa a radiação solar diária e cálculo da radiação na partição horária e diária. O sistema é composto por 4 módulos escritos separadamente no sentido de oferecer maior flexibilidade à execução das tarefas. Os módulos são: Digitalização, Controle de Qualidade, Contagem e Banco de Dados. A Fig. 2 mostra os módulos que compõem o sistema.

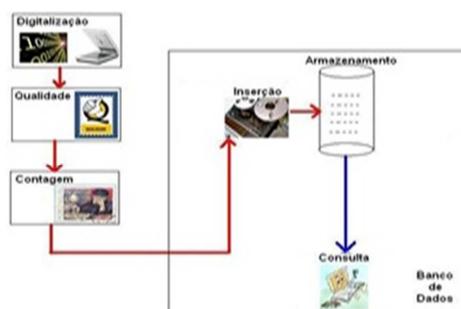


Figura 2: Módulos do “Sistema de digitalização e processamento de informações gráficas da radiação solar global monitorada por actinógrafos”.

No Módulo Digitalização, um processo de captura de imagens foi desenvolvido para padronização. As fitas que contém os dados do actinógrafo foram digitalizadas utilizando o scanner HP® sendo as fitas digitalizadas em formato com 200dpi (Dots per inch) para que o software possa processá-los. As fitas são contínuas e contém divisões para as 24 horas diárias descritas no topo do cartão. Porém os dados medidos pelo actinógrafo são coletados no período de fotoperíodo positivo. Por esse motivo, as fitas digitalizadas foram recortadas e a parte selecionada compreende os horários entre as 05h e 20h, evitando processamento desnecessário da imagem. Um redimensionamento das imagens também se fez necessário para padronização do processamento, adotando-se como largura 900 pixels. Os actinogramas foram salvos no formato bitmap 256 cores.

No Módulo de Controle de Qualidade, as imagens foram analisadas para facilitar sua representação e cálculos. Ferramentas para auxílio na detecção e reforço de bordas (Pedrini e Schwartz, 2008) foram adicionadas ao software, tendo em vista que a técnica de subtração de imagens para a eliminação da grade de fundo não foi bem sucedida. As ferramentas implementadas foram: ferramenta “contorno”, ferramenta “borracha” e ferramenta “área”. A ferramenta “contorno” é utilizada para o reforço da curva pelo usuário. A ferramenta “borracha” permite a correção de pixels em excesso na imagem. Já a ferramenta “área” é utilizada para destaque da área sob a curva, realizada por meio do objeto floodfill da linguagem orientada à objeto Delphi Pascal. A técnica faz a varredura na imagem e identifica pixels que estão na fronteira entre duas regiões com características relativamente distintas, caracterizadas por suas descontinuidades, encontrando assim as bordas de um objeto na imagem (González e Woods, 2000). Detectada as bordas a ferramenta pinta a área de vermelho para que o software a reconheça e realize os cálculos.

Após o pré-processamento realizado pelo Módulo de Controle de Qualidade, o Módulo Contagem realiza a contagem dos pixels sob a curva traçada, convertendo-os em seguida em valores energéticos (MJ/m²) referentes à quantidade de radiação solar global incidente. Como o processo é automatizado, a contagem é efetuada por hora e dia, podendo futuramente ser ampliada para cálculos por minuto ou conforme a necessidade do usuário. Para realização dos cálculos, o software realiza uma contagem dos pixels de cor vermelha e faz a conversão para MJ/m². Por fim foi realizado um teste de validação para verificar a eficiência do método proposto de cálculo da radiação solar na partição diária. O sistema proposto foi comparado com um sistema tradicional de medida pelo actinógrafo e com um sistema atual de medida por meio de equipamentos modernos conhecidos por piranômetros acoplados a um datalogger que realiza o monitoramento automatizado no formato digital.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Desenvolvimento do sistema proposto (software)

Para o desenvolvimento do software foram realizados testes onde as imagens digitalizadas passaram por processamentos com técnicas de realce de imagens utilizando métodos de realce de imagem no domínio espacial que se refere ao próprio plano da imagem, e as abordagens nesta categoria são baseadas na manipulação direta dos pixels das imagens (González e Woods, 2000). Esses métodos foram testados na eliminação da grade de fundo dos actinogramas para facilitar o reconhecimento e realce da curva. Durante os testes observou-se que as cores das fita apresentaram um padrão de difícil representação, pois a curva possuía vários tons de cinza misturados a tons de vermelho. A Fig. 3 mostra as tonalidades de cinza, branco e vermelho que compõem o padrão de cores dos actinogramas.

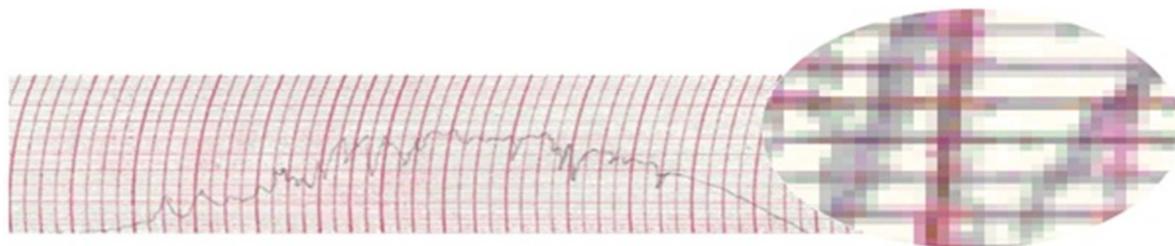


Figura 3: Falta de uniformidade entre as tonalidades de cinza, branco e vermelho para pixels da imagem.

A falta de uniformidade das cores das imagens impossibilitou o uso da eliminação dos tons de vermelho, pois a grade não é totalmente eliminada e havia a perda de muita informação da curva. A Fig. 4 mostra um actinograma após a aplicação do filtro de remoção de cores específicas (vermelho).

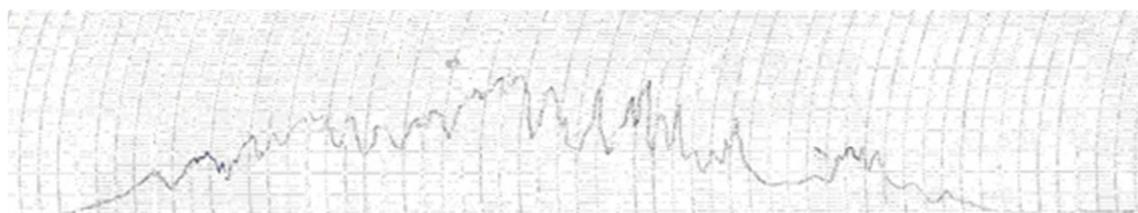


Figura 4: Resultado da eliminação de tons de vermelho.

Uma das técnicas utilizadas nos testes para o reconhecimento da curva foi baseada na técnica de Subtração de Imagens onde a diferença entre duas imagens $f(x, y)$ e $h(x, y)$ é obtida através da subtração entre todos os pares de pixels correspondentes de f e h . A diferença entre imagens é representada por $g(x, y) = f(x, y) - h(x, y)$ (Gonzales e Woods, 2000). Uma varredura pixel a pixel é realizada pelo software em duas imagens de fitas do actinógrafo: uma ainda não utilizada e, portanto limpa e a outra com os dados experimentais. O software realiza uma varredura simultânea nas duas imagens realizando a subtração entre os pixels correspondentes. Valores de zero indicam pixels iguais nas duas imagens e, portanto podem ser excluídos, atribuindo-se então um pixel branco (fundo branco). Valores diferentes de zero mostram que os pixels são diferentes e, muito provavelmente o pixel da segunda imagem representa um pixel pertencente à curva traçada pelo actinógrafo quando da variação da radiação solar. Neste caso atribui-se um pixel da cor preta (curva em preto). A desvantagem apresentada por essa técnica consiste na perfeita sincronização espacial das duas fitas utilizadas. Fitas levemente deslocadas espacialmente produzem resultados inconsistentes, visto que os pares de pixels não são correspondentes. Nesse sentido, os testes de subtração de imagens não apresentaram resultados adequados, consequência do difícil alinhamento entre as imagens utilizadas. A eliminação da grade de fundo foi insuficiente para o realce da curva.

Na tentativa de solucionar o problema da detecção da borda, foram adicionadas ferramentas operacionais ao software baseadas no conceito de vizinhança e adjacência entre pixels (Pedrini e Schwartz, 2008; Artero e Tommazelli, 2009). Foram propostas três ferramentas: “contorno”, “borracha” e “área”. A ferramenta “contorno” adicionada ao software garantiu qualidade ao processo de cálculo das radiações. O cálculo da radiação depende da análise da área de um polígono convexo, obtido pela ferramenta “contorno” que preenche os contornos ausentes por deficiência da digitalização da imagem. O usuário, utilizando o mouse, pinta a curva para que a ferramenta “área” possa ser usada. A Fig. 5 mostra o uso da ferramenta “contorno”. A pintura dos pixels é feita baseada na vizinhança de pixels, onde um pixel p de uma matriz com coordenadas (x, y) possui oito vizinhos, quatro nas linhas e colunas localizados nas coordenadas $(x-1, y)$, $(x+1, y)$, $(x, y-1)$ e $(x, y+1)$ e outros quatro nas diagonais $(x-1, y-1)$, $(x-1, y+1)$, $(x+1, y-1)$ e $(x+1, y+1)$ (Pedrini e Schwartz, 2008; Artero e Tommazelli, 2009).

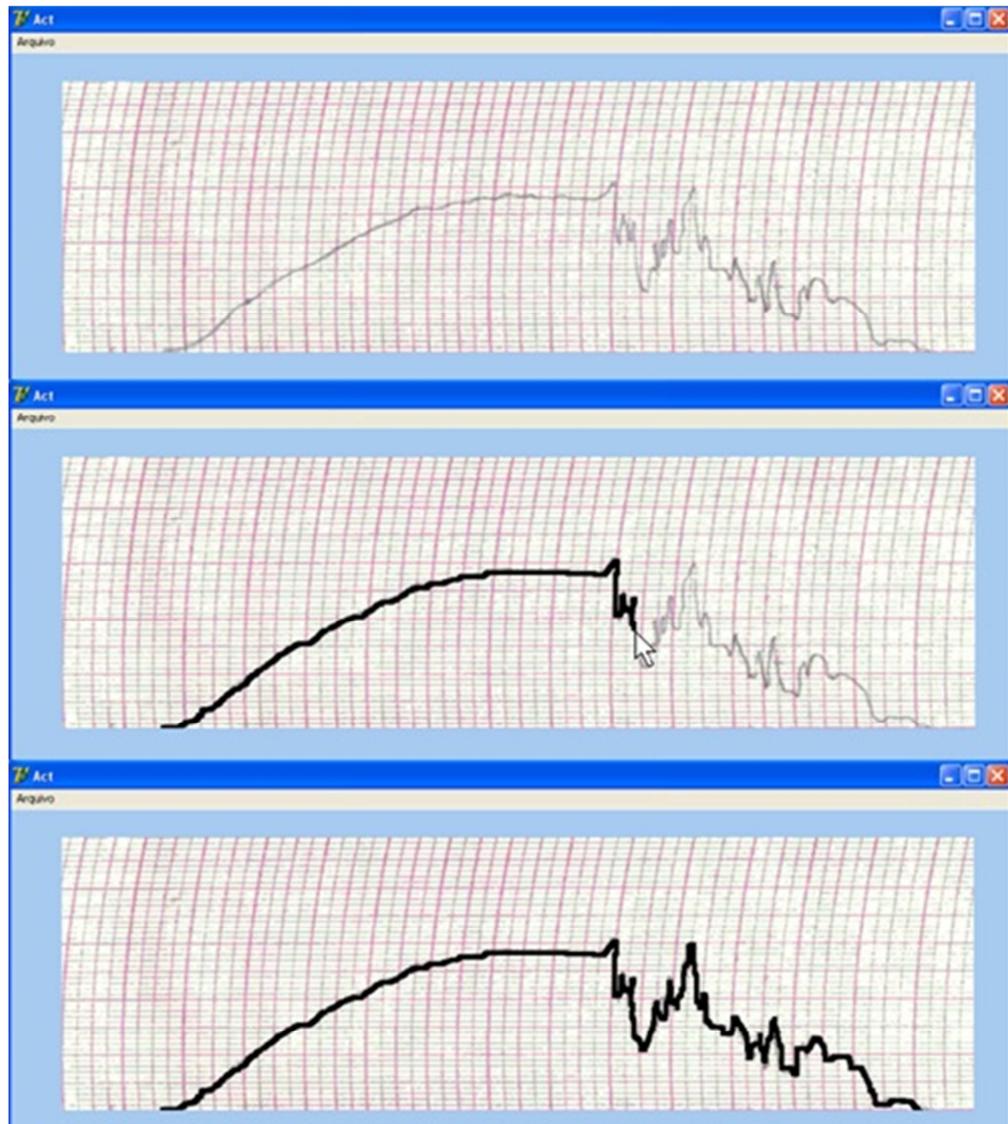


Figura 5: Uso da ferramenta “contorno” para reforço das bordas da curva de interesse.

Para a identificação da área a ser calculada utilizamos a ferramenta “área”. Essa ferramenta faz a detecção dos pixels internos em uma curva de um polígono fechado por meio do método de rotulamento de imagens, que corresponde à identificação de regiões pré-determinadas. Para esse fim, cada pixel receberá um rótulo, podendo ser uma cor ou um número inteiro (neste caso, diferente da cor preta), que identificará a região a qual ele pertence. No rotulamento, partindo de um ponto interno a uma curva fechada, o algoritmo identificará todos os pixels contidos no interior dessa curva. Em outras palavras, o algoritmo, partindo de um ponto pré-selecionado pelo usuário, atribui a cor vermelha aos pixels até que se encontrem os pixels de cor preta referentes às bordas da região fechada de interesse. A Fig. 6 mostra o rotulamento empregado pelo software, destacando-se a área em vermelho sobre a qual atua o Módulo Contagem para cálculo do valor energético da radiação solar global incidente.

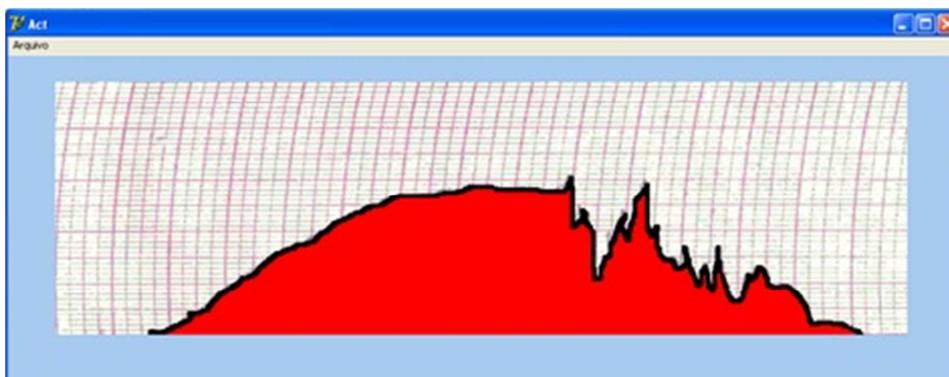


Figura 6: Aplicação da ferramenta “área” por meio do método floodfill para preenchimento em vermelho da área sob a curva de interesse.

Calibração e Validação

Para fazer a conversão de quantidade de pixels lidos para radiação solar global em MJ/m², foi necessário efetuar a calibração do software. Os dados referentes ao ano de 2011 foram submetidos a um controle de qualidade, sendo 13% dos valores excluídos em função de problemas operacionais. Em seguida, os valores foram colocados em uma tabela em ordem cronológica crescente. Aplicou-se então uma rotina computacional para realizar a separação dos dados a serem utilizados na calibração e na validação. A cada quatro dias, três foram selecionados para calibração e um para a validação.

Para obter o fator de calibração, a radiação solar global de referência foi correlacionada com a quantidade de pixels por meio da equação (1):

$$y = a \cdot x \quad (1)$$

onde y representa a radiação solar global de referência, a o fator de calibração e x a quantidade de pixels. Por meio de regressão linear, o valor obtido para a foi de $6,247 \times 10^{-4}$ MJ/m².pixel, com coeficiente de correlação de 0,945. A Figura 7 mostra o gráfico da calibração do software proposto.

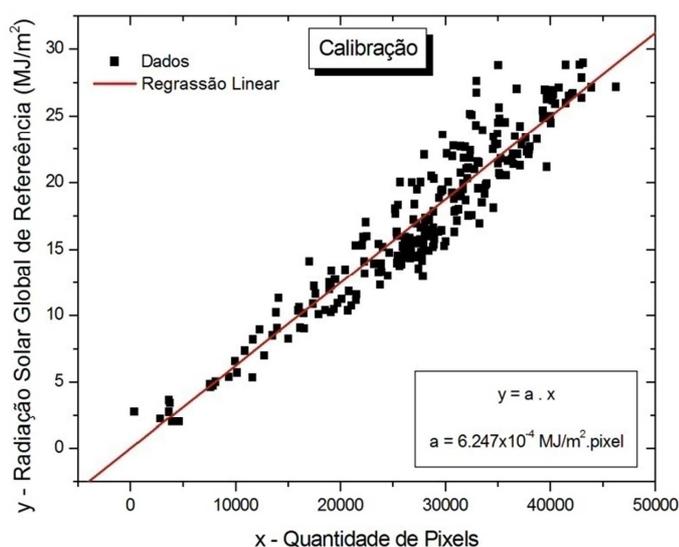


Figura 7: Curva de calibração do software proposto

Para efetuar a validação do software, o fator de calibração encontrado foi multiplicado pelo número de pixels de uma base de dados independente para estimativa da radiação solar global. Esse valor estimado foi comparado com o valor da radiação solar global de referência. A figura 8 mostra a curva de validação entre os dois métodos de medida da radiação solar global.

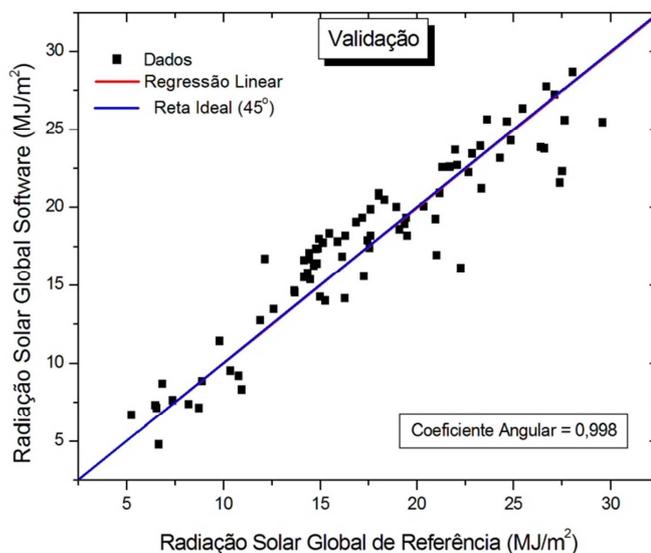


Figura 8: Curva de validação do software proposto.

Os indicadores estatísticos usados na validação do sistema proposto foram o MBE e o RMSE (Stone, 1993), dados pelas equações (2) e (3).

$$MBE = 100 \left(\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i) / N}{\bar{x}} \right) \quad (2)$$

$$RMSE = 100 \left(\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2 / N}}{\bar{x}} \right) \quad (3)$$

onde y_i representa os valores estimados, x_i os valores de referência, \bar{x} o valor de referência médio e N o número de observações. O desvio das médias MBE (Mean Bias Error) é um indicativo que fornece informação no desempenho de um modelo a longo prazo. Um valor positivo indica uma superestimação, pelo modelo, da radiação. Para um valor negativo ocorre o inverso. Quanto menor seu valor absoluto, melhor é seu desempenho. Já raiz quadrada do desvio quadrático médio RMSE (Root Mean Square Error) fornece informação quanto ao desempenho do modelo à curto prazo. Quanto menor seu valor, menor a dispersão dos dados em torno do modelo. O valor de MBE de 1,15% obtido da validação mostra que o sistema proposto de processamento digital dos actinogramas é eficiente para o cálculo da radiação solar global, com uma superestimativa da ordem de 1%. Quanto ao RMSE, seu valor mostra uma dispersão de 11,90% dos dados estimados em relação aos medidos. A análise dos indicadores estatísticos, juntamente com o coeficiente angular de 0,998 mostra que o sistema proposto de processamento digital dos actinogramas é adequado no cálculo da radiação solar global monitorada por actinógrafos.

No entanto, o software proposto pertence a um projeto que se encontra ainda em andamento, onde rotinas e filtros de técnicas diversas continuam sendo implementadas e testadas no reconhecimento da curva de interesse para melhorar a qualidade do processamento das informações gráficas dos actinogramas. Como procedimento de rotina, os actinogramas da Estação Meteorológica de Botucatu estão sendo digitalizados para que, ao término do projeto, o software possa ser testado com uma base de dados mais consistente e significativa, onde poderão ser identificados comportamentos e tendências temporais dos dados resultantes da aplicação das técnicas de Processamento de Imagens Digitais no monitoramento da radiação solar global por actinógrafos.

CONCLUSÃO

A análise preliminar dos indicadores estatísticos mostrou que o software proposto apresentou desempenho satisfatório na medida da radiação solar global na partição diária, com uma diferença média da ordem de 1% em relação ao método de referência. No entanto, o estudo não é conclusivo em função da pequena quantidade de dados fornecidos para a validação do software. A continuidade do projeto permitirá o teste de novos filtros na detecção da curva de interesse, assim como a utilização de uma base de dados maior, a qual já está sendo providenciada pela Estação Meteorológica de Botucatu por meio da digitalização dos actinogramas.

REFERÊNCIAS

- Artero A. O. e Tommazelli A. M. G. (2009). Detecção e afinamento de bordas em direções previamente conhecidas. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 15, p. 157-177.
- Dal Pai A. e Rodrigues D. e Dall'antonia L. C. e Martins D. (2010). Contagem de horas de brilho solar usando técnicas de processamento digital de imagens. In: III Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belém-PA. CD Anais III Congresso Brasileiro de Energia Solar.
- Gonzalez R. C. e Woods R. E. (2000). *Processamento de Imagens Digitais*. São Paulo: Edgard Blücher. 509p.
- Lara L. L. e Artaxo P. e Martinelli L. A. e Camargo P. B. e Victoria R. L. e Ferraz E. S. B. (2005). Properties of aerosols from sugar-cane burning emissions in Southeastern Brazil. *Atmospheric Environment*, v.39, p. 4627–4637.
- Paine S. H. e Lodwick G. D. (1989). Edge Detection and Processing of Remotely Sensed Digital Images. *Photogrammetria*, v. 43, n. 6, pp. 323-336.
- Pedrini H. e Schwartz W. R. (2008). *Análise de imagens digitais*. 508 p.
- Wang C. e Stefanidis A. e Croitoru A. e Agouris P. (2008). Map Registration of Image Sequences Using Linear Features. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 74, n. 1, pp. 25-38.
- Stone R. J. (1993). Improved statistical procedure for evaluation of solar radiation estimation models. *Solar Energy*, Phoenix, 51., 289-91.

CALIBRATION AND VALIDATION OF A METHOD OF MEASUREMENT OF GLOBAL SOLAR RADIATION BASED ON DIGITAL IMAGE PROCESSING TECHNIQUES

Abstract: The objective of this paper is to develop an actinogram scanning and processing computer system based on Digital Image Processing techniques for daily and hourly global solar radiation. The proposed software is being developed at the Faculdade de Tecnologia de Botucatu and the actinograms were provided by the Botucatu Weather Station located in Faculdade de Ciências Agrônomicas-UNESP-Botucatu. Preliminary analyzes indicate satisfactory performance of the proposed software, generating measures in the same order of magnitude of the reference method for daily values. The proposed software belongs to a project that is still in progress, where routines and various filter techniques are still being implemented and tested in the recognition of the curve of interest to improve the quality of the graphic information processing. The actinograms of the Botucatu Weather Station are being scanned so that the end of the project, the software can be tested with a more consistent and significant database. So, it will be possible to identify data behaviors and temporal trends resulting from application of Digital Imaging Processing techniques in the monitoring of solar radiation by actinographs.

Key words: solar radiation, actinograph, scanning, computer system.