

CONTAGEM DE HORAS DE BRILHO SOLAR USANDO TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Alexandre Dal Pai – adalpai@fatecbt.edu.br

Faculdade de Tecnologia de Botucatu – FATEC/BT

Douglas Rodrigues – email: douglasrodrigues.dr@gmail.com

Universidade Estadual de São Paulo, Departamento de Recursos Naturais – Setor Ambientais

Luiz Carlos Dall’Antonia Junior – e-mail: lcdajunior@fca.unesp.br

Universidade Estadual de São Paulo, Departamento de Recursos Naturais – Setor Ambientais

Dinival Martins – e-mail: dinival@fca.unesp.br

Universidade Estadual Paulista – UNESP/Botucatu, Departamento de Recursos Naturais

Resumo. O objetivo do trabalho foi o desenvolvimento de um sistema informático de gerenciamento, digitalização, filtragem e processamento de dados de horas de brilho solar monitorados por heliógrafos em estações meteorológicas. Por meio de técnicas de processamento digital de imagens, as horas de brilho solar foram contabilizadas de forma automatizada, formando uma base de dados diária, comum na maioria das estações meteorológicas, e uma base de dados horária, o que representa uma novidade, já que a mesma é dificilmente utilizada pela dificuldade do processo de contagem manual. O sistema foi dividido em módulos e desenvolvido na linguagem orientada a objetos Delphi. É composto pelos módulos de digitalização, responsável pela escolha do heliograma apropriado em função da sazonalidade; módulo de controle de qualidade, responsável da aplicação de filtros no domínio espacial para realce e reforço das bordas para melhor identificação das partes queimadas; e módulo de contagem, responsável pela contagem dos pixels pertencentes à queima do papel, com técnicas retilíneas para heliogramas Primavera-Outono e curvilíneas para heliogramas Verão-Inverno. Para verificação de desempenho do software, foi utilizada uma base de dados diária de fevereiro a julho de 2010 que, após aplicação das técnicas de processamento digital de imagens, apresentaram resultados satisfatórios. Para maior confiabilidade do sistema, sugere-se que o software seja validado com uma base de dados mais extensa.

Palavras-chave: Brilho Solar, Heliógrafo, Processamento Digital de Imagens

1. INTRODUÇÃO

O correto conhecimento dos níveis de radiação solar incidente numa determinada região guarda especial importância em setores estratégicos como economia, política e meio ambiente. Países emergentes ou em desenvolvimento usam informações da distribuição da energia solar para seu melhor aproveitamento na aplicação de políticas sociais, disponibilizando para setores carentes da sociedade tecnologias para melhor aproveitamento dessa forma alternativa de energia.

A radiação solar é uma forma de energia limpa e barata e constitui a principal fonte de energia para processos físicos, biológicos e químicos, tais como derretimento de gelo das calotas polares, fotossíntese vegetal, evapotranspiração, crescimento de culturas, dentre outras. Serve também como parâmetro para avaliação de riscos de incêndios florestais, modelos de simulação hidrológica e modelos matemáticos de processos naturais. A partir de uma base de dados de qualidade é possível dimensionar sistemas para armazenamento e conversão, principalmente nas áreas de arquitetura, conforto térmico, processos térmicos de aquecimento de água e painéis fotovoltaicos.

Mudanças nos níveis de radiação solar podem provocar mudanças climáticas drásticas, afetando diretamente a produção agrícola. Em algumas estações de radiometria espalhadas no mundo têm-se observado diminuição da quantidade de radiação solar ao longo das décadas. A causa provável desta redução significativa é o aumento de aerossóis e poluentes lançados diariamente na atmosfera, modificando significativamente suas propriedades óticas e sua distribuição de nuvens, contribuindo de forma negativa para o efeito do aquecimento global. Muitos pesquisadores utilizam informações sobre a redução de radiação solar para estudos de poluição e impacto ambiental.

A melhor forma de se saber o perfil de radiação de uma localidade é por meio de medidas. Entretanto, na ausência de medidas, modelos podem ser criados para estimativa de valores perdidos ou ausentes. Com dados de brilho solar, que são mais comuns, estima-se a radiação global e, devidamente armazenada, serve de parâmetro para elaboração de mapas e/ou cartas solares. Os modelos podem ser estatísticos, estocásticos e de redes neurais.

A medida de horas de brilho solar é uma medida indireta da radiação solar global e uma das mais antigas. Na literatura há evidências de registros de dados de brilho solar de mais de 80 anos, enquanto que a base de dados de radiação solar global, medida por piranômetros, é relativamente mais recente.

Com a introdução de aparelhos mais modernos de medidas, o monitoramento ambiental (aquisição e armazenamento) tornou-se automático e digital. Porém a coleta de dados de horas de brilho solar não acompanhou essa

modernidade e continua sendo efetuada de forma manual, podendo acarretar erros de interpretação devido à complexidade e subjetividade na observação da medida. A digitalização da aquisição de dados de brilho solar permite a padronização no processo de coleta e melhor controle de qualidade. No entanto, problemas de umidade do papel ainda influenciam a precisão da medida.

Informações de brilho solar de anos e até décadas passadas poderão ser recuperadas por meio de um sistema de digitalização. Rotinas poderão ser inseridas no sentido de se separar o dia em horas, permitindo maior detalhamento da distribuição do brilho solar ao longo do dia e dos anos.

Com um banco de dados digital de brilho solar nas partições horária e diária, informações valiosas poderão ser trocadas mais facilmente pelas instituições de pesquisa em virtude da padronização do processo, garantindo confiabilidade de resultados e com recuperação de informações do passado.

O objetivo do trabalho foi o desenvolvimento de um sistema informático de gerenciamento, digitalização, filtragem e processamento de dados de horas de brilho solar monitorados por heliógrafos em estações meteorológicas. Os dados digitalizados de horas de brilho solar comporão uma base de dados nas partições de tempo diária e horária, servindo de parâmetro de entrada em diversos estudos de modelagem.

2. METODOLOGIA

2.1 Local e instrumentação

O sistema de gerenciamento e digitalização de informações de horas de brilho solar foi desenvolvido na Faculdade de Tecnologia de Botucatu (FATEC). Os dados de brilho solar, juntamente com os cartões queimados referentes às medidas, foram cedidos pela Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP (Botucatu), a qual mantém um banco de dados registrado em formato de papel desde 1971. A estação meteorológica da UNESP está localizada nas coordenadas geográficas 22,85S de latitude, 48,45W de longitude e 786m de altitude.

A Fig. 1 mostra um heliógrafo usado na medida das horas de brilho solar. O heliógrafo é uma esfera de vidro que funciona como uma lente convergente. Um cartão graduado é posicionado no foco dos raios convergidos pela esfera.



Figura 1 - Heliógrafo para medir horas de brilho solar.

Em dias de céu aberto, os raios queimam o papel e em dias de céu nublado, o papel não é queimado devido à sombra provocada pelas nuvens. A parte queimada do papel descreve uma trajetória retilínea ou curvilínea, dependendo da época do ano, representando o decorrer das horas do dia. A Fig. 2 mostra três cartões utilizados em estações meteorológicas: um cartão para o verão, um para outono e primavera e um para o inverno. Os cartões diferenciados justificam-se por valores diferentes de declinação solar e fotoperíodo entre as estações do ano.

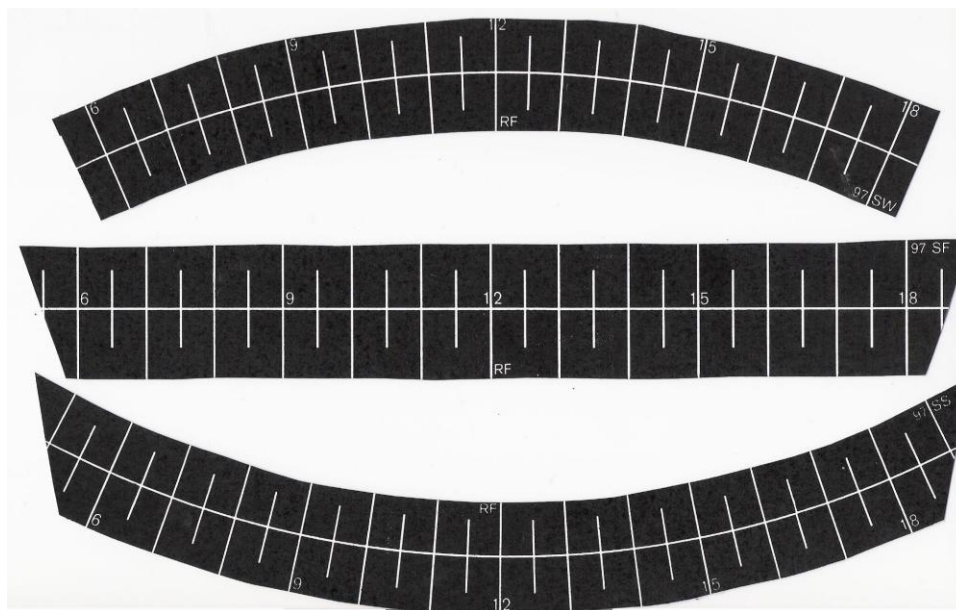


Figura 2 - Cartões utilizados no heliógrafo para diferentes estações do ano.

2.2 Sistema proposto

O Sistema de Gerenciamento e Digitalização das Horas de Brilho Solar foi implementado utilizando a linguagem Object Pascal. Com a RAD (*Rapid Application Development*) Delphi, foi possível criar uma interface visual simples, onde o usuário pode realizar a captura e o processamento das imagens de forma rápida e precisa.

O sistema é composto por três módulos escritos separadamente no sentido de oferecer maior flexibilidade à execução das tarefas. Os módulos são: Digitalização, Controle de Qualidade e Contagem.

No Módulo Digitalização, um processo de captura de imagens foi desenvolvido para padronização. Após a captura, no Módulo de Controle de Qualidade, as imagens são analisadas para facilitar sua representação e contagem de pixels. As imagens digitalizadas passam por processos de melhoramento de contraste e brilho, efetuado por meio de técnicas de processamento em domínio espacial, conforme a necessidade da aplicação.

Após o pré-processamento realizado pelo Módulo de Controle de Qualidade é aplicado o Módulo Contagem, responsável pela contagem de horas de insolação horária e diária. Foram desenvolvidas duas rotinas de processamento de contagem: uma para heliogramas retilíneos e outra para heliogramas curvilíneos através da aplicação de conceitos da geometria analítica. A contabilização da quantidade de pixels de uma região da imagem determina quanto tempo o sol brilhou para aquela hora. Após a contabilização de todas as horas, os valores acumulados indicam quanto tempo o sol brilhou durante aquele dia.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema de gerenciamento e digitalização de informações de horas de brilho solar é composto por 3 módulos. A explicação da construção de cada um dos módulos é dada a seguir. Na fase de desenvolvimento, vários testes de realce e segmentação foram efetuados na busca pela melhor técnica. Segundo Gonzalez e Woods (2000), esse processo de tentativa e erro na escolha da técnica apropriada é da natureza do processamento de imagens digitais, onde cada aplicação requer uma abordagem diferente.

3.1 Módulo digitalização

A escolha do heliograma apropriado está condicionada às características geoespaciais da localidade de medida. Locais com latitude diferente apresentam fotoperíodo diferente, condicionando o uso dos heliogramas. Portanto, o intervalo de tempo de uso de um determinado tipo de heliograma depende de cada região. Nesse sentido, através dos botões de controle *RadioButton* do ambiente de programação Delphi, é permitida, ao usuário, a escolha do período e do heliograma apropriado para aquela época do ano.

Segundo Suehrcke (2000), a existência de três formatos para os heliogramas se justifica pela sazonalidade da localidade. Dependendo da época do ano, a concentração dos raios solares pelo heliógrafo pode ocorrer em posições diferentes em sua base, necessitando o heliograma apropriado para a queima do papel. Portanto, no inverno usa-se um heliograma curvado mais curto com concavidade voltada para baixo devido ao menor fotoperíodo posicionado na posição mais afastada da base do aparelho. No outono/primavera usa-se o heliograma reto em uma posição

intermediária em relação à base do aparelho e no verão um heliograma curvado mais longo com concavidade voltada para cima, situado na posição mais próxima da base, conforme Fig. 2.

Uma vez concluída a escolha do heliograma, o software requisita a leitura do arquivo que contém a imagem digitalizada do heliograma. O arquivo deve ser armazenado com um formato de nome que possa ser reconhecido pelo software. Portanto as digitalizações foram armazenadas em arquivos nomeados com a respectiva data da medida. Foi adotado o formato *helAAAAMMDD.bmp*, onde o prefixo “*hel*” foi inserido para indicar que o arquivo é originário da digitalização de um heliograma, AAAA indica o ano no formato de 4 dígitos, MM o mês no formato de 2 dígitos e DD o dia no formato de 2 dígitos. Selecionou-se a extensão de arquivo .bmp por representar a extensão mais comum para armazenamento de imagens digitais, permitindo o intercâmbio de informações entre diferentes tipos de computadores. A partir do nome do arquivo, foi efetuada uma análise léxica do mesmo, separando os caracteres para formação da data da medida. Após a separação dos elementos da data, a mesma foi reconstruída e apresentada pela propriedade *Caption* do objeto de controle *Label*. A Fig. 3 mostra o nome do arquivo e sua reconstrução pelo software.



Figura 3 - Tela do software proposto contendo em destaque a data já reconstruída a partir da análise do nome do arquivo.

Para realização da digitalização dos heliogramas foram elaboradas 3 máscaras de digitalização: uma para heliogramas Primavera-Outono; uma para Verão; e uma para Inverno. A Fig. 4 mostra as 3 máscaras de digitalização propostas.

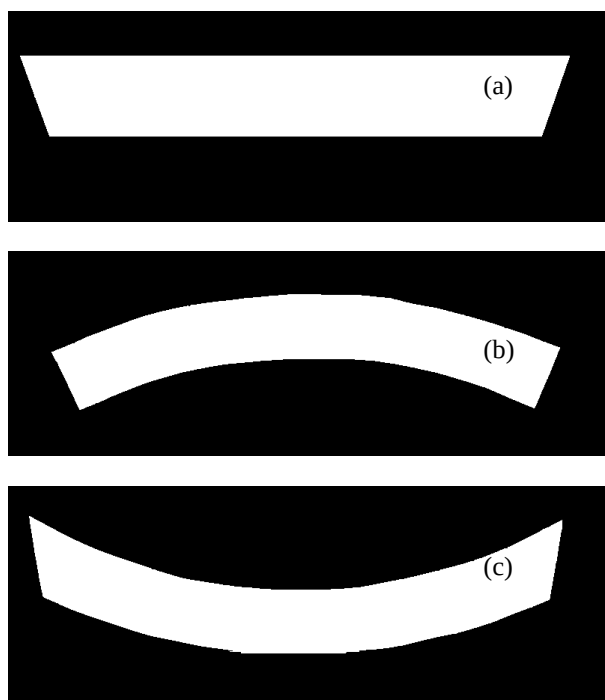


Figura 4 - Máscaras para digitalização dos 3 tipos de heliogramas. a) Primavera-Outono. b) Verão. c) Inverno.

O intuito de se propor máscaras para digitalização é facilitar a análise dos elementos da imagem. A dimensão de bordas da figura, assim como a altura e largura da imagem são parâmetros importantes na localização geométrica de pontos, retas e curvas na mesma. A identificação dessas informações permite calcular a quantidade de pixels existentes por hora e assim melhorar a precisão da medida.

Uma vez conhecida essas informações sobre as dimensões dos heliogramas, a leitura dos mesmos fica independente da resolução espacial, pois o software irá relativizar todas as medidas perimetrais da figura. Essa vantagem permite o uso desde máquinas digitalizadoras mais simples encontradas em impressoras multifuncionais até mesas profissionais usadas para análises cartográficas. Para que diferentes tamanhos de figuras possam ser exibidas na tela, um fator de conversão foi proposto para adaptar o tamanho da imagem original para o tamanho a ser exposto na tela do computador.

Para contagem das horas de brilho solar foi digitalizada a parte de trás dos heliogramas objetivando simplificar a análise e o reconhecimento dos elementos a serem processados da figura. A parte da frente dos heliogramas apresenta variações de cor entre as regiões de medida, apesar de recomendação em contrário da Organização Mundial de Meteorologia. No entanto, devido às dificuldades financeiras e operacionais, as localidades utilizam heliogramas de cores diferentes, dificultando a análise e o processamento das informações contidas na imagem. Além dessa problemática, dependendo da intensidade da luz solar, os heliogramas podem se apresentar perfurados quando a luz solar é intensa ou levemente queimados, porém não perfurados, quando a luz solar é fraca. Se o processamento se basear na digitalização da parte da frente do heliograma, a parte levemente queimada se confundiria com a textura do fundo da imagem, subestimando as horas de brilho solar. Esse problema não aparece se a opção for a digitalização de parte de trás do heliograma, pois para um fundo branco, qualquer intensidade solar fica registrada no papel de forma bem delimitada e de fácil reconhecimento. O fato de se utilizar a parte de trás dos heliogramas permite a inversão das horas, sendo o início da manhã representada pelo lado direito da imagem e o período da tarde registrado no lado esquerdo da mesma.

Os heliogramas são processados pelo software como uma imagem binária, composta pelas cores preto e branco, onde informações sobre características serão extraídas. Nesse sentido deve-se dar preferência à digitalizações em preto e branco. No entanto, digitalizações em tons de cinza também podem ser utilizadas. Através da análise do histograma de tons de cinza, o software permite transformar uma imagem originalmente de tons de cinza em preto e branco. Após vários testes de análises de histogramas dos 3 tipos de heliogramas foi escolhido o limiar 164 para binarização, ou seja, pixels com tons de cinza de 0 até 164 foram considerados pixels da cor preta, enquanto que de 165 até 255 foram considerados pixels da cor branca. A Fig. 5 mostra uma imagem digitalizada em tons de cinza e sua respectiva transformação binária.

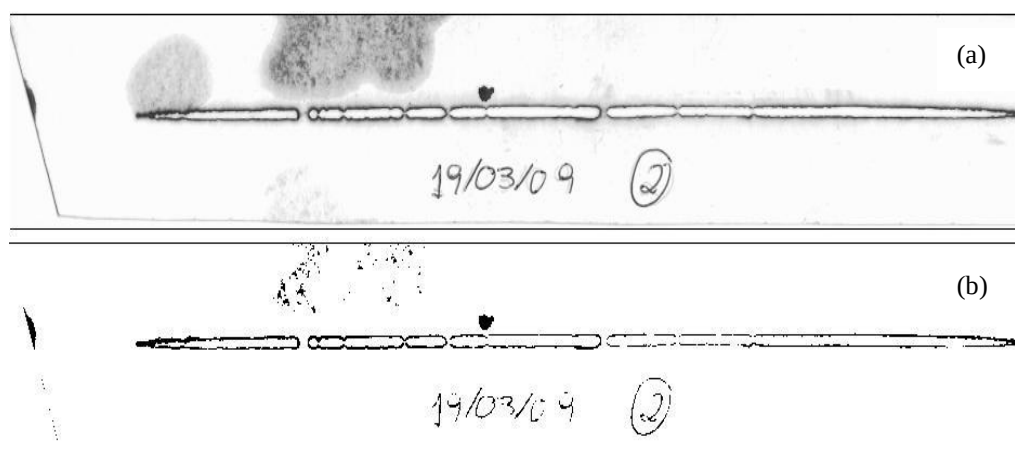


Figura 5 - Processo de binarização de imagem digital. a) Imagem digitalizada em tons de cinza. b) Imagem binária.

No último passo é permitido ao usuário selecionar as áreas de interesse que representam a queima do papel pelo Sol. Nesse sentido basta clicar com o *mouse* sobre as áreas desejadas para seleção. O software pinta as áreas selecionadas com a cor vermelha para destaque, evidenciando a queima do papel. Esta técnica de preenchimento de área é conhecida como *watershed*, a qual se interpreta a imagem a ser segmentada como sendo uma superfície topográfica, em que as intensidades dos pixels correspondem a valores de altitude ou elevação dos pontos. Dessa forma, o conjunto de pixels da imagem forma uma superfície composta por vales e picos com diversas elevações. Para detecção dos contornos, aplica-se então o método *Floodfill* do ambiente de programação Delphi que significa “completar por inundação”. Começa-se assim a inundar a partir de regiões mais baixas da superfície e quando os vales são gradativamente inundados, bacias de retenção são formadas. Após completada a inundação, linhas de contenção entre as diferentes bacias são formadas, definindo os contornos dos objetos.

Como o processo de inundação é sensível ao ruído, foram disponibilizadas as técnicas de realce de imagens por meios dos operadores matemáticos dilatação e gradiente de Sobel.

3.2 Módulo controle de qualidade

No Módulo de Controle de Qualidade são apresentadas rotinas para realce e aprimoramento de detalhes das imagens digitalizadas, permitindo maior segurança na análise das informações. Como o software permite a seleção de áreas de interesse pelo usuário, esta seleção deve ser delimitada por áreas bem definidas, o que é alcançado pelo conceito de vizinhança, conectividade e adjacência. Vizinhança representa os pixels que circundam o pixel de interesse. Conectividade verifica se dois pixels são vizinhos e se satisfazem determinados critérios de similaridade, tais como mesmo nível de cinza. Adjacência verifica se dois pixels são vizinhos e conexos entre si, permitindo a formação de um caminho. Se este caminho for fechado, há a formação de uma região que pode ser entendida como uma área. Portanto, para que o software entenda a existência de uma região de interesse, é necessária a existência de um caminho fechado

para que a seleção possa ser efetuada.

É possível que algumas digitalizações não produzam o efeito esperado e apresentem algum tipo de deficiência na captura da imagem. Imagens com ruído podem apresentar erros na captura de bordas, comprometendo a eficiência do reconhecimento de áreas de interesse na imagem. Nesse sentido foram propostas duas técnicas de realce no domínio espacial para melhor evidenciar as bordas do heliograma digitalizado: operador morfológico dilatação e operador gradiente.

Um operador morfológico é um mapeamento entre um conjunto A de pixels que define a imagem e um conjunto B, chamado elemento estruturante, o qual é expresso em função de uma origem local. Segundo Minkowski apud Pedrini (2008) a operação de dilatação entre o conjunto A e o elemento estruturante B é definida como:

$$\mathcal{D}(A, B) = A \oplus B = \bigcup_{b \in B} (A + b) \quad (1)$$

De acordo com a equação (1), o processo de dilatação entre A e B corresponde ao conjunto de todas as translações de B com os pontos da imagem em que há pelo menos um elemento não nulo em comum com o conjunto A, ou seja, a adição de A com B é obtida pela translação de B com relação a cada elemento de A, tomando-se a união de todas as translações resultantes. Neste caso o elemento estruturante B utilizado foi uma matriz quadrada de ordem 3. A Fig. 6 mostra a imagem original, a imagem dilatada e o elemento estruturante utilizado na transformação.

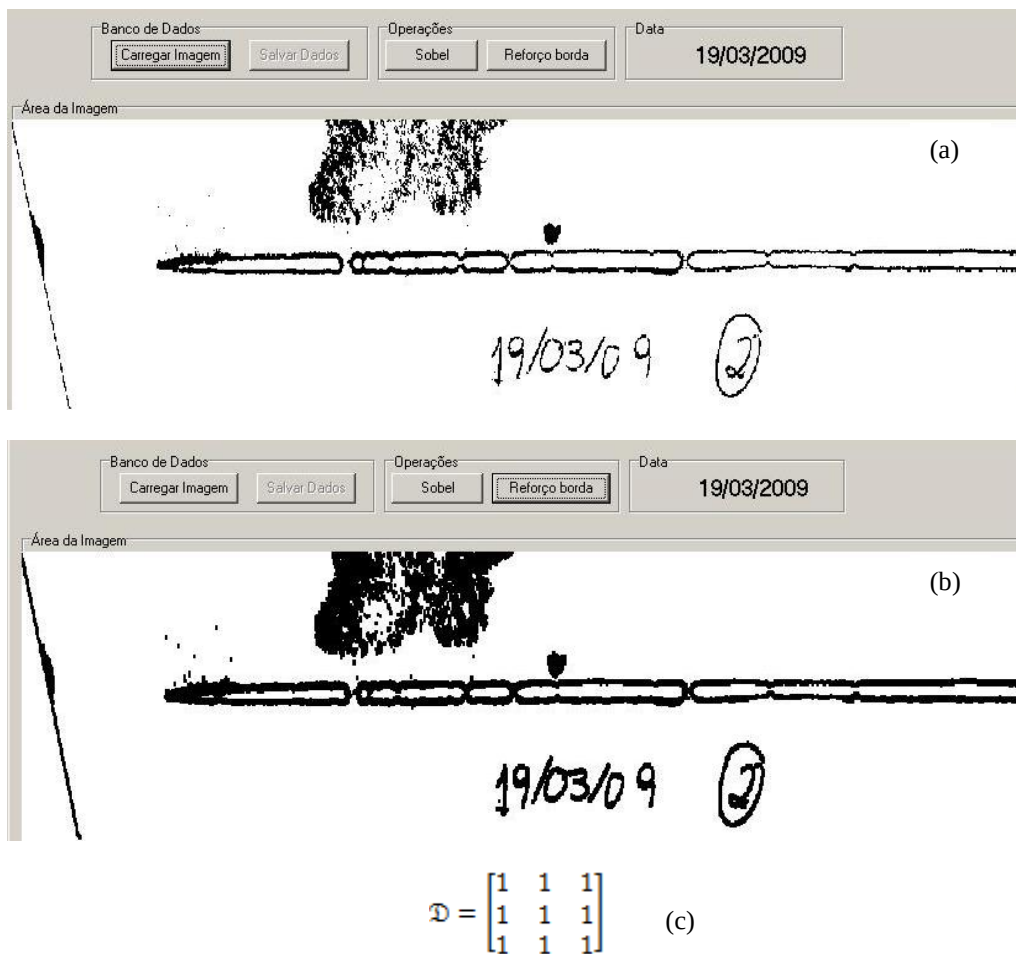


Figura 6 - Aplicação do operador morfológico de dilatação no heliograma digital. a) Imagem original. b) Imagem dilatada. c) Elemento estruturante.

Outra técnica aplicada para melhorar a identificação e fechamento das bordas foi a aplicação do operador gradiente. Esta técnica prioriza o reconhecimento de bordas que é, essencialmente, a operação de identificação de mudanças locais significativas nos níveis de cinza da imagem. Essas mudanças podem ser descritas por meio do conceito de derivada. Como a imagem depende de suas coordenadas espaciais, as bordas da imagem podem ser expressas por derivadas parciais. O operador gradiente indica a direção dos locais nos quais os níveis de cinza sofrem maior variação. O vetor gradiente $\nabla f(x,y)$ de uma imagem na posição (x,y) pode ser calculado pelas derivadas parciais:

$$\nabla f(x, y) = \frac{\partial f(x,y)}{\partial x} + \frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \quad (2)$$

Na forma matricial, o gradiente da imagem pode ser expresso como:

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Segundo Sobel (1990), a magnitude do gradiente equivale à maior taxa de variação de $f(x,y)$ por unidade de distância na direção de $\nabla f(x,y)$. Em razão do custo computacional, a magnitude do gradiente pode ser aproximada pelo uso de valores absolutos dados por:

$$|\nabla f| \approx |G_x| + |G_y| \quad (4)$$

Uma mudança em intensidade pode ser detectada pela diferença entre os valores de pixels adjacentes. Bordas verticais podem ser detectadas pela diferença horizontal entre pontos, enquanto bordas horizontais podem ser detectadas pela diferença vertical entre pontos adjacentes da imagem. Foi adotada a proposta do operador gradiente de Sobel (1990), aproximando a magnitude do gradiente como a diferença de valores ponderados dos níveis de cinza da imagem como:

$$G_x \approx [f(x+1, y-1) + 2f(x+1, y) + f(x+1, y+1)] - [f(x-1, y-1) + 2f(x-1, y) + f(x-1, y+1)] \quad (5)$$

$$G_y \approx [f(x-1, y+1) + 2f(x, y+1) + f(x+1, y+1)] - [f(x-1, y-1) + 2f(x, y-1) + f(x+1, y-1)] \quad (6)$$

As máscaras mostradas na equação (7) implementam o operador de Sobel, em que os níveis de cinza dos pixels de uma região são sobrepostos pelas máscaras centradas no pixel (x,y) da imagem.

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

A Fig. 7 mostra a aplicação do operador de Sobel no heliograma digitalizado, priorizando a identificação das bordas das imagens.

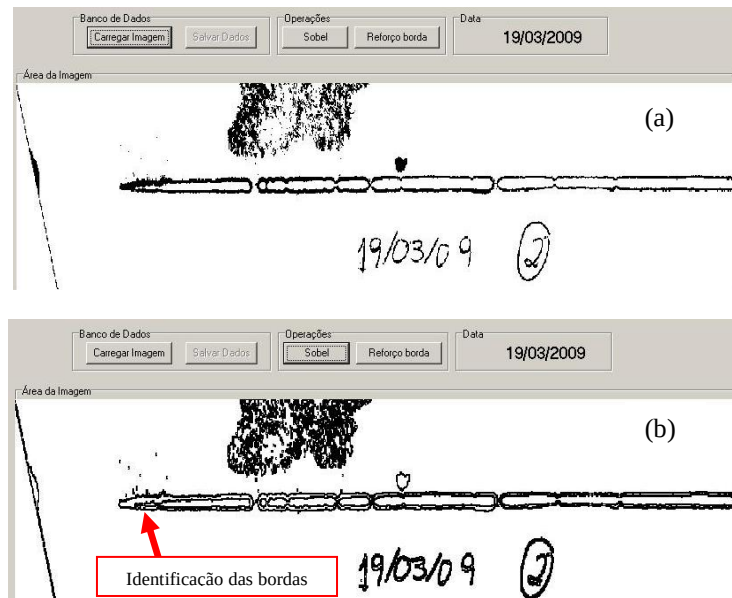


Figura 7 - Aplicação do operador gradiente de Sobel. a) Imagem original. b) Imagem com uso do operador gradiente.

3.3 Módulo contagem

O Módulo Contagem realiza a contagem das horas de brilho solar devido à queima dos heliogramas. O Módulo Contagem foi dividido em duas etapas: processamento de heliogramas retilíneos (Primavera/Outono) e processamento de heliogramas curvilíneos (Verão/Inverno). Foi necessária a divisão, pois os heliogramas apresentam naturezas distintas, sendo que o primeiro requer contagem de pixels nas coordenadas retangulares pelo fato do heliograma

apresentar características retilíneas, enquanto que o segundo precisou do desenvolvimento de uma rotina geométrica que tratou da transformação das coordenadas retangulares para as coordenadas esféricas.

Processamento de heliogramas retilíneos. No heliograma retilíneo Outono/Primavera, a queima do papel, quando houver, descreverá uma trajetória retilínea ao longo das horas. Nesse caso, é necessário o conhecimento da posição das horas no papel para a associação correta da queima com a hora de interesse.

Os heliogramas retilíneos apresentam intervalo de medida do período das 5h 30min até às 18h 30min, representando um total de 13 horas. Dessa forma, a partir da largura da imagem, o software divide a largura da imagem por 13 horas para se ter uma estimativa da quantidade de pixels, ao longo do eixo horizontal, que formam 1 hora.

Conhecendo-se o comprimento do intervalo horário em pixels, criou-se uma rotina para pesquisar a ocorrência de evidências positivas de queima do papel nas colunas. Para otimizar o processo, a busca nas colunas pode ser interrompida em duas situações distintas: quando se atinge o topo da coluna sem encontrar evidências positivas; ou quando um pixel vermelho é encontrado por meio da inversão do valor de uma variável booleana. No caso, uma evidência positiva de queima de papel significa o encontro de um pixel da cor vermelha, visto que a decisão da escolha da parte queimada é deixada a cargo da seleção pelo usuário diretamente na figura. A Fig. 8 mostra o processo de varredura e checagem dos pixels selecionados na imagem por meio da busca nas colunas.

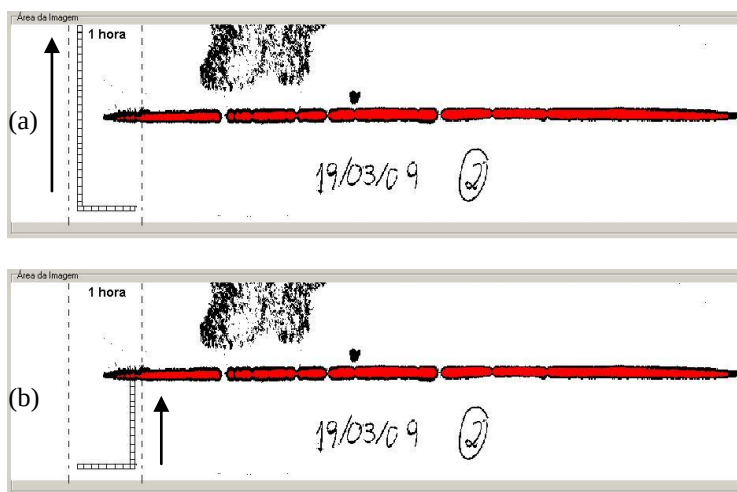


Figura 8 - Processo de varredura e checagem dos pixels selecionados na imagem por meio da busca nas colunas. a) Parada ao término da coluna. b) Parada ao encontrar pixel vermelho (queima do papel).

Na Fig. 8a observa-se que o critério de parada baseia-se no fim da coluna enquanto que na Fig. 8b baseia-se no encontro de um pixel marcado pelo usuário. Esta técnica permite reduzir o tempo de processamento, pois o encontro de um pixel vermelho dispensa a repetição da rotina para os pixels restantes daquela coluna. Toda vez que uma evidência é encontrada, incrementa-se um contador que, dividido pela quantidade total de pixels daquela hora, resulta na quantidade de horas de insolação daquela hora específica.

O processo se repete para todas as horas do dia e os resultados são armazenados num vetor de 14 posições, variando de 5 a 18 horas. Após o processamento horário do heliograma, o software promove a soma do conteúdo do vetor, resultado no total diário de insolação. A Fig. 9 apresenta o resultado do processamento horário e diário para o heliograma do dia 19/03/2009.

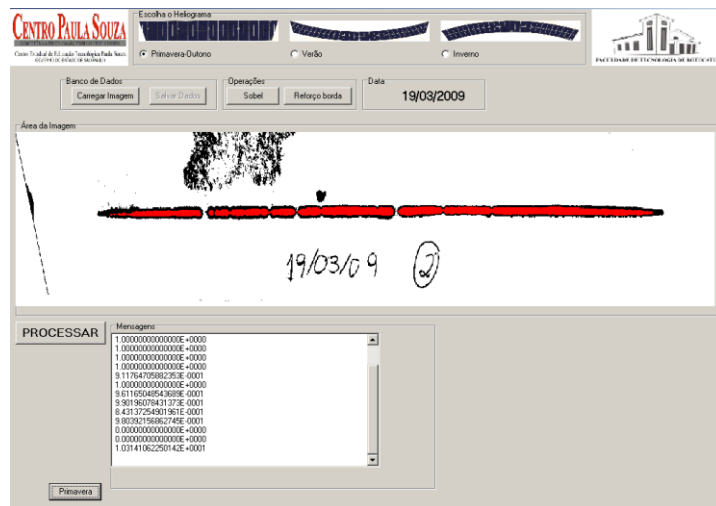


Figura 9 - Processamento horário e diário para o heliograma retilíneo do dia 19/03/2009.

Processamento de heliogramas curvilíneos. Para o desenvolvimento da rotina para contagem de pixels dos heliogramas Verão/Inverno foi necessário aplicar um tratamento geométrico, visto que os mesmos apresentam características circulares/curvilíneas. Portanto, ao invés de se trabalhar com pixels nas coordenadas retangulares, foram calculadas informações angulares que nortearam o cálculo das horas de brilho solar. A Fig. 10 mostra aspectos angulares dos heliogramas curvilíneos.

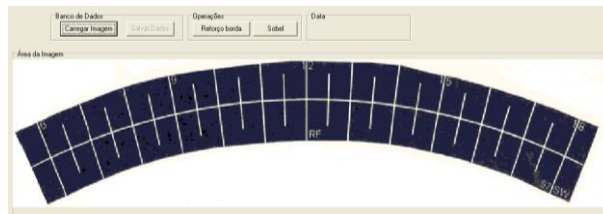


Figura 40 - Aspectos angulares dos heliogramas curvilíneos.

Diferentemente dos heliogramas retilíneos, onde se calculou a quantidade de pixels por hora, para os heliogramas curvilíneos foi calculada a variação angular por hora por meio de conceitos de geometria analítica. A Fig. 11 mostra os elementos iniciais da análise geométrica dos heliogramas curvilíneos.

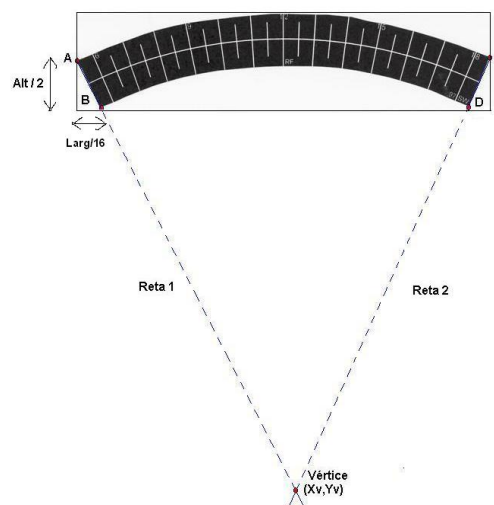


Figura 51 - Elementos geométricos iniciais para processamento de heliogramas curvilíneos.

Inicialmente foram determinadas as coordenadas de 4 pontos principais obtidos e fixos a partir da digitalização: A, B, C e D. As coordenadas (x,y) dos pontos são: A(0,Altura/2); B(Largura/16,Altura); C(Largura,Altura/2); e D((Largura-Largura/16),Altura), onde Largura representa o comprimento da imagem no eixo horizontal x e Altura

representa o comprimento da imagem no eixo vertical y. Essa padronização foi efetuada por meio do uso de régua, transferidor e compasso nos modelos originais. Uma vez conhecidas as coordenadas dos pontos, foram calculadas, via conceito de matrizes e determinantes, as equações das retas 1 e 2 entre os pontos A-B e C-D respectivamente. O cálculo de seus coeficientes angulares e lineares são dados por:

$$\text{Reta 1} \quad a_1 = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \quad b_1 = \frac{x_B y_A - x_A y_B}{x_B - x_A} \quad (8)$$

$$\text{Reta 2} \quad a_2 = \frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} \quad b_2 = \frac{x_D y_C - x_C y_D}{x_D - x_C} \quad (9)$$

Em seguida, foi realizada a intersecção das retas 1 e 2 para se calcular as coordenadas do vértice X_v e Y_v , dadas pelas equações:

$$X_v = \frac{b_2 - b_1}{a_2 - a_1} \quad Y_v = a_1 X_v + b_1 \quad (10)$$

Uma vez conhecida as coordenadas do vértice e os coeficientes angulares das retas 1 e 2, foi possível calcular a variação angular do heliograma curvilíneo que, dividido por 13 horas (quantidade de horas do heliograma curvilíneo), resultou na variação angular por hora.

A partir da variação angular por hora e das coordenadas do vértice, calculou-se a equação da reta para cada hora específica. O valor do coeficiente angular e linear das retas horárias obtidas permitiu estimar o valor do pixel da base da imagem de cada reta e a diferença entre pixels da base de retas adjacentes permitiu o cálculo da quantidade total de pixels que compõem a base daquele intervalo horário. A Fig. 12 mostra uma seção extraída do heliograma curvilíneo destacando retas horárias adjacentes e a quantidade de pixels da base pertencente à variação angular daquela determinada hora.

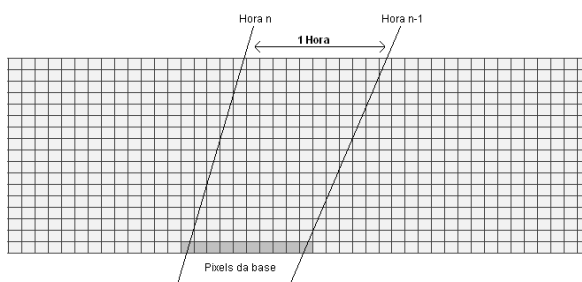


Figura 62 - Construção do intervalo horário para heliogramas curvilíneos. Retas horárias adjacentes e quantidade de pixels da base.

Aprofundando a discussão no intervalo horário, para cada pixel da base foi calculada uma equação da reta. Tal procedimento se fez necessário em virtude do processo de busca de evidências de queima do papel para os heliogramas curvilíneos. O processo de busca para os heliogramas retilíneos baseia-se na procura ao longo das colunas (sentido vertical). Já nos heliogramas curvilíneos, a busca é realizada ao longo das retas obtidas, o que prioriza uma busca na direção diagonal, visto que a análise apresenta características angulares. Nesse sentido, a quantidade de pixels que compõem a base do intervalo horário representa, além da quantidade de retas calculadas, a quantidade total de buscas realizadas naquele referido intervalo. Se todas as buscas apresentarem resultado positivo para a queima do papel, conclui-se que a quantidade de insolação para àquela hora específica foi de 100%. A Fig. 13 mostra um intervalo horário destacando os pixels que compõem a base e suas respectivas retas.

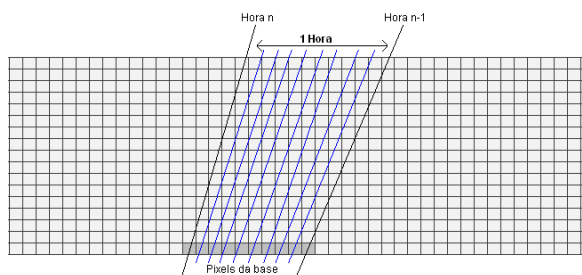


Figura 73 - Pixels da base no intervalo angular horário e suas retas de verificação.

Cada reta traçada a partir de um pixel da base é composta por um conjunto de valores variáveis de X e Y até atingir o topo da figura, descrevendo uma trajetória diagonal. Dessa forma, para cada reta, a verificação da queima de

papel é feita por meio de uma rotina computacional que percorre um caminho, no plano xy, formado pelos pixels contemplados pela equação da reta. Para comparar os valores gerados pelas retas e os valores xy dos pixels foi utilizada as funções *round* e *trunc* da programação do Delphi, que permitiu arredondar ou truncar um número decimal calculado pela equação da reta para um número inteiro, com o qual se representa os pixels.

Uma vez iniciada a busca pelo caminho proposto pela reta, o critério de parada baseia-se ou na chegada ao topo da figura, ou seja, ao último pixel válido da figura, ou quando um pixel vermelho, evidência de queima de papel, é encontrado. A Fig. 14 mostra, em destaque, o caminho percorrido pela busca e os critérios de parada por evidências de queima de papel.

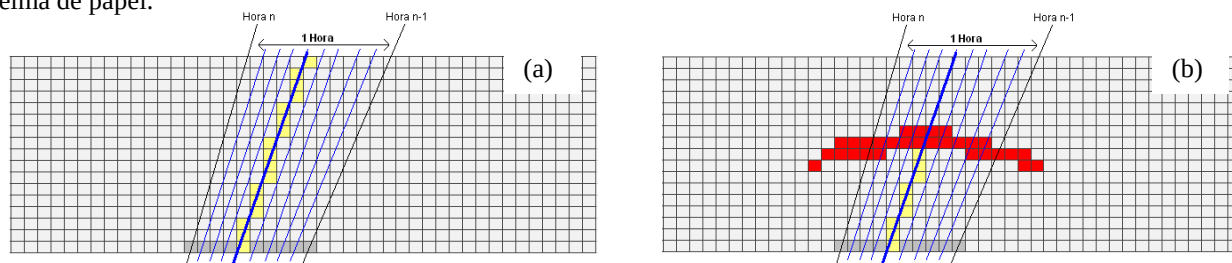


Figura 84 - Caminho percorrido pela busca ao longo da reta de verificação e os critérios de parada por evidências de queima de papel. a) Parada ao término da reta de verificação. b) Parada ao encontrar pixel vermelho (queima do papel).

Na Fig. 14a o critério de parada baseia-se no pixel do topo de reta de verificação enquanto que, pela Fig. 14b, o critério de parada baseia-se no encontro de um pixel vermelho. Toda vez que um pixel vermelho é encontrado ao longo do caminho, uma variável contadora, dentro do laço horário, é incrementada, indicando um valor de insolação para aquela verificação. Ao final da hora, esta variável contadora conterá informação sobre a quantidade de retas que passam por pixels vermelhos e assim, dividindo este valor pela quantidade total de retas do intervalo horário, resulta no valor de insolação solar média horária. Este procedimento é executado para todas as horas do dia e os resultados são armazenados em um vetor de 14 posições, variando de 5 a 18, coincidindo com as horas do dia. No final do dia, este vetor é somado, resultando na insolação solar média diária. Uma vez calculadas as insolações médias horária e diária, os dados são gravados num banco de dados para armazenamento das informações. No banco de dados diário são gravadas também as informações sobre as efemérides da localidade. A Fig. 15 apresenta o resultado do processamento horário e diário para o heliograma curvilíneo do dia 28/06/2009.

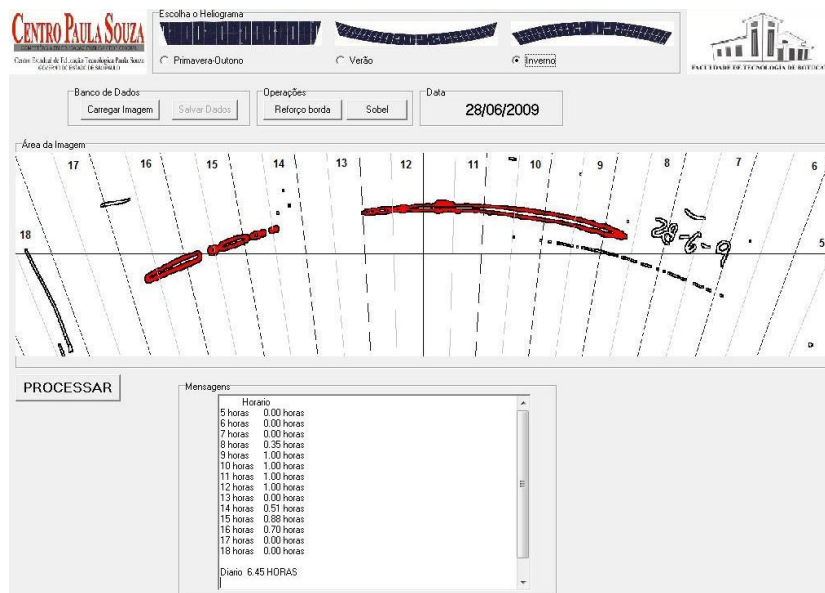


Figura 95 - Processamento horário e diário para o heliograma curvilíneo do dia 28/06/2009.

3.4 Validação

Foram efetuados 2 testes para validação do software: o primeiro para verificar o grau de ajustamento entre os dados gerados pelo processo manual e pelo software; o segundo para verificar o comportamento dos dados dos processos manual e pelo software na estimativa da radiação global pela equação de Angstron.

A Figura 16a mostra a evolução temporal dos dados obtidos pelo processo manual e pelo software. Verifica-se que as medidas apresentam mesmo comportamento, porém ligeiramente diferentes. Já na Figura 16b é apresentada a

correlação entre os dados obtidos dos dois métodos. A reta de regressão coincide com a reta de 45°, o que mostra boa concordância entre os métodos de medidas.

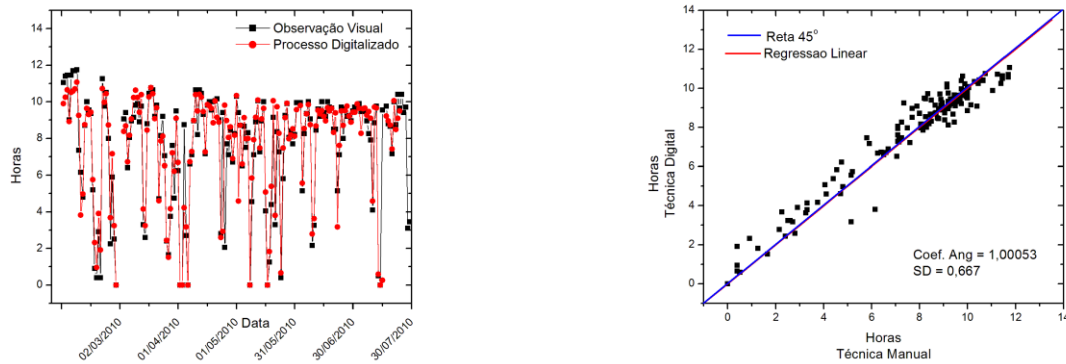


Figura 16. a) Evolução temporal das horas de brilho solar pela técnica manual e pela técnica digital. b) Correlação entre as horas medidas pelas técnicas manual e digital.

Para estimativa da radiação global foi usada a equação de Angstrom para Botucatu (Eq (11)) e a validação usou os indicadores estatísticos da Tabela 1.

$$\frac{H_G}{H_o} = 0,24 + 0,51 \left(\frac{n}{N} \right) \quad (11)$$

Tabela 1. Indicativos estatísticos na validação da estimativa da radiação global.

Indicativo Estatístico	Símbolo	Fórmula	Intervalo	Ideal
Mean Bias Error	BEM	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)$		0
Mean Absolute Error	MAE	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i - O_i $	≥ 0	0
Root Mean Square Error	RMSE	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}$	≥ 0	0
Modelling Efficiency	ME	$\frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2)}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$	≤ 1	1

O MBE representa o desvio simples, o MAE o desvio absoluto, o RMSE o desvio-padrão e ME a eficiência do modelo.

A Figura 17a mostra a evolução temporal da radiação global medida, estimada pela técnica manual e estimada pela técnica digital. Observa-se que tanto o processo manual quanto a digital promovem uma leve superestimativa dos valores da radiação global. Este fato pode ser também observado pela Figura 17b, a qual mostra a correlação entre os dados obtidos dos diferentes métodos de medida. Verifica-se também que os valores estão levemente acima da reta de 45°, evidenciando uma leve superestimativa.

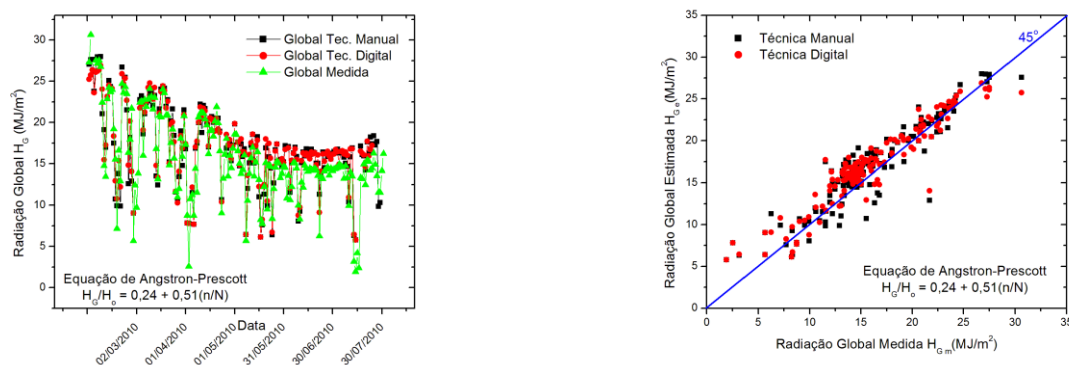


Figura 17. a) Evolução temporal da radiação global medida e estimada pelas técnicas manual e digital. b) correlação entre os valores estimados da radiação global pelas técnicas manual e digital e os valores medidos.

O resultado da validação a partir dos indicadores estatísticos é mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Validação

Metodo	MBE (MJ/m ²)	MAE (MJ/m ²)	RMSE (MJ/m ²)	ME
Tecnica Manual	0,996	1,711	2,142	0,840
Técnica Digital	1,135	1,671	2,054	0,857

A partir dos valores de MBE observa-se uma pequena superestimativa nos valores da radiação global. Em relação à técnica, os valores estão na mesma ordem de grandeza. Os valores próximos de RMSE indicam que as técnicas são similares quanto ao espalhamento produzido nos valores da radiação global, enquanto que o ME indica uma boa eficiência das técnicas usadas na modelagem. Com base nesse resultado, recomenda-se o uso da técnica digital.

4 CONCLUSÃO

O uso da técnica digital via processamento de imagens digitalizadas mostrou ser uma ferramenta importante na padronização de processos de uma estação meteorológica. Além da criação de um acervo digital de dados de insolação, erros relacionados à subjetividade na interpretação da medida foram minimizados. Com base nos resultados estatísticos, recomenda-se o uso da técnica digital na medida da insolação.

REFERÊNCIAS

- Gonzalez, R. C.; Woods, R. E., 2000. Processamento de Imagens Digitais. Tradução Roberto Marcondes César Junior, Luciano da Fontoura Costa. São Paulo: Edgard Blücher, 509p.
- Pedrin, H; Schwartz, W. R. 2008. Análise de imagens digitais – princípios, algoritmos e aplicações. Editora Thomson. 508p.
- Sobel, I., 1990. An anisotropic 3x3 image gradient operator. Machine Vision for Three-Dimensional Scenes, p.376-9.
- Suehrcke, H., 2000. On the relationship between duration of sunshine and solar radiation on the Earth's surface: Angstrom's equation revisited. Solar Energy, v.68, n.5, 417-425.

SUNSHINE HOURS COUNTING USING DIGITAL IMAGE PROCESSING TECHNIQUES

Abstract. *The objective was to develop a computerized system for scanning, filtering and processing sunshine hours monitored by weather stations. Using digital image processing techniques, sunshine hours were automated recorded in a daily database, common in most weather stations, and in a hourly database, which represents a novelty since the difficulty of the manual counting process. The system was divided into modules using object-oriented Delphi language. The modules are: scanning module, quality control module and counting module. The system performance was tested with some days with good agreement with the manual counting process. To improve the computerized system reliability, more tests need to be done with a greater sunshine hour database.*

Key words: *Sunshine Hours, Heliograph, Digital Image Processing*