

Revista Brasileira de Cartografia (2014) N^o 66/2: 379-392
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

DINÂMICA DOS FOCOS DE QUEIMADA EM CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO ENTRE 2008 E 2011

Dynamics of Sugarcane Pre-harvest Burning Fires in São Paulo State between 2008 and 2011

Guilherme Augusto Verola Mataveli¹; Bruno Silva Oliveira¹; Gabriel Pereira²; Elisabete Caria Moraes¹ & Francielle da Silva Cardozo¹

**¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Divisão de Sensoriamento Remoto – DSR**

Caixa Postal 515 – 12227-010 – São José dos Campos, SP – Brasil
mataveli@dsr.inpe.br, bruno.so@dsr.inpe.br, bete@dsr.inpe.br, cardozo@dsr.inpe.br

**²Universidade Federal de São João del Rei – UFSJ
Departamento de Geociências**

Caixa Postal 110 – 36361-360 – São João del Rei, MG - Brasil
pereira@ufsj.edu.br

*Recebido em 14 de Maio, 2013/ Aceito em 26 de Dezembro, 2013
Received on May 14, 2013/ Accepted on December 26, 2013*

RESUMO

As queimadas atingem grandes áreas da superfície em todo o planeta, provocando diversos impactos no ambiente assim como atuando para a formação dos ecossistemas. A atividade humana é a causa mais comum da queima de biomassa na região Tropical, sendo que a utilização do fogo ocorre principalmente na agropecuária, em atividades como a colheita da cana-de-açúcar, na qual facilita o corte a partir da queima da palhada. Com o objetivo de acabar com essa prática no Estado de São Paulo devido aos seus impactos negativos sobre o meio ambiente e a saúde, em 2002 foi aprovada a Lei Estadual 11.241 e em 2007 o Protocolo Etanol Verde, que estabeleceram um cronograma para a eliminação da queimada pré-colheita da cana-de-açúcar. Dentro deste contexto, o presente estudo avaliou a distribuição espacial e temporal dos focos de queimada em áreas de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo entre 2008 e 2011 por meio de sensoriamento remoto orbital usando dados dos sensores MODIS, AVHRR, SEVIRI e GOES *Imager*. Normalmente, as queimadas são espacialmente associadas à cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, sendo o SEVIRI, a bordo do satélite METEOSAT, o mais eficiente para a detecção de focos de queimada em cana-de-açúcar, chegando a detectar um número de focos 10 vezes maior que o MODIS e 8,5 vezes maior que o AVHRR durante o período de estudo. A Região Administrativa do Estado de São Paulo que geralmente apresentou a maior densidade média de focos estimada com o uso do estimador por Kernel foi a de Ribeirão Preto, e as densidades médias mínimas foram encontradas na sua maioria na Região Administrativa de Sorocaba. A distribuição temporal dos focos de queimada foi avaliada utilizando a Transformada de *Wavelet*, que mostrou um padrão consistente com a época de colheita da cana-de-açúcar, com um ciclo a cada 256 dias aproximadamente. Novas metodologias aplicadas ao monitoramento de queimadas podem ser desenvolvidas integrando-se dados de sensores a bordo de satélites de órbita geostacionária

com dados sensores a bordo de satélites de órbita polar, o que parece ser o caminho mais eficiente para detecção de focos em áreas de queimada de cana-de-açúcar.

Palavras chaves: Sensoriamento Remoto, Cana-de-açúcar, Estimador de Densidade por Kernel, Transformada de *Wavelet*.

ABSTRACT

Fires occur in large areas and in different landscapes across the planet, provoking impacts in surface as well as acting like an agent for the formation of ecosystems. During sugarcane harvest, is common to burn straw to facilitate harvest. With the objective to eliminate this practice in São Paulo State due to the negative impacts over environment and health, in 2002 was approved the State Law 11.241 and in 2007 the Green Ethanol Protocol, which defined a schedule for the elimination of pre-harvest burning in sugarcane areas. In this context, this study aims to evaluate the spatial and temporal distribution of fires in sugarcane areas of São Paulo State between 2008 and 2011 through orbital remote sensing using data from MODIS, AVHRR, SEVIRI and GOES *Imager* sensors. Usually, fires are spatially associated with sugarcane crop, being SEVIRI onboard METEOSAT satellite the most efficient sensor evaluated for identifying sugarcane pre-harvest burning fires, detecting a number of fires 10 times greater than MODIS and 8,5 times greater than AVHRR during the study period. The Administrative Region of São Paulo State which generally presented the highest average density of fires estimated using Kernel estimator was Ribeirão Preto, and the lowest average density was usually found in the Administrative Region of Sorocaba. Temporal distribution of fires was evaluated using Wavelet Transform, showing a pattern consistent with sugarcane harvest season, with a cycle of approximately 256 days. New methodologies applied for monitoring fires can be developed by integrating data from sensors onboard polar orbit satellites and sensors onboard geostationary orbit satellites, which seems to be the most efficient way to detect sugarcane pre-harvest burning fires.

Keywords: Remote Sensing, Sugarcane, Kernel Density Estimator, Wavelet Transform.

1. INTRODUÇÃO

As queimadas atingem grandes áreas da superfície em todo o planeta, constituindo-se como um agente modelador dos ecossistemas, tais como as florestas e as savanas (ICHOKU et al., 2008), e contribuindo para o acúmulo de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases do efeito estufa na atmosfera, afetando assim a qualidade do ar local e regional (KAISER et al., 2012).

Cerca de 90% das queimadas são causadas pelo homem, estando os 10% restantes relacionados a acidentes ou causas naturais, como raios (ANDREAE e MERLET, 2001; ICHOKU et al., 2012). Em uma escala global, entre 3547 e 3938 Tg de matéria seca são consumidos anualmente por queimadas antrópicas, sendo que aproximadamente dois terços deste total são queimados em grandes incêndios, principalmente nas regiões de savana (LAUK e ERB, 2009).

A atividade humana é a causa mais comum da queima de biomassa na região Tropical, com a utilização do fogo principalmente para: a) abertura de novas áreas destinadas à atividade agropecuária, b) a limpeza de áreas e rotação de culturas agrícolas, controle de pragas, remoção

de vegetação seca e restos do cultivo e c) aumento e manutenção de pastagens (LAUK e ERB, 2009).

A queima de biomassa varia muito em termos de tamanho, intensidade, processo de ignição, taxa de propagação, duração, sazonalidade, recorrência e características de emissão, dependendo do tipo de ecossistema, localização, clima predominante e as características do combustível (ICHOKU et al., 2012). Comparado às queimadas de grande intensidade, como as que ocorrem na Floresta Amazônica, as queimadas na agricultura são geralmente menores, com menor intensidade e duração, o que dificulta sua detecção por meio de sensores orbitais (VADREU et al., 2011).

No Brasil, o processo de colheita manual da cana-de-açúcar tradicionalmente emprega a queimada pré-colheita para facilitar o corte da cana-de-açúcar. Com a rápida expansão do cultivo da cana-de-açúcar na última década, especialmente depois do ano de 2003, essa prática vem sendo combatida devido aos seus impactos negativos ocasionados principalmente pela emissão de gases poluentes sobre a saúde e o meio ambiente (AGUIAR et al., 2011).

Os estudos relacionados às queimadas foram realizados durante muitas décadas a partir de experimentos e medições *in situ*, porém a cobertura espacial e temporal desse tipo de abordagem é limitada (ANDREAE e MERLET, 2001). Nos últimos anos, com o avanço no sensoriamento remoto orbital, as dificuldades impostas por essas limitações diminuíram, possibilitando a aquisição de informações em nível global de forma sistemática (ICHOKU et al., 2012), tornando os dados provenientes de sensores orbitais a principal fonte de dados para estudar as queimadas (HANTSON et al., 2013; ICHOKU et al., 2008).

Nesse contexto, este estudo avaliou a distribuição espacial e temporal dos focos de queimada captados por meio de sensoriamento remoto orbital em áreas de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo nos anos entre 2008 e 2011.

2. CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO

O Brasil é um dos líderes mundiais na produção e exportação de vários produtos agropecuários, sendo o maior produtor de cana-de-açúcar e maior exportador de açúcar e álcool do mundo (AGUIAR et al., 2007). O Estado de São Paulo é o principal produtor nacional, e somente na safra 2012/2013 foi responsável por uma área cultivada de mais de 5 milhões e 533 mil hectares de cana-de-açúcar (CANASAT, 2013).

Devido ao interesse em diminuir a dependência de combustíveis fósseis e da preocupação ambiental global, o uso do etanol está tomando proporções mundiais, estimulando a expansão do cultivo da cana-de-açúcar (AGUIAR et al., 2009). A crescente demanda de etanol produzido a partir da cana-de-açúcar, especialmente depois do ano de 2003 com a popularização dos carros bicompostíveis no Brasil, causou uma rápida expansão dessa cultura durante os últimos anos (RUDORFF et al., 2010).

Durante a colheita da cana-de-açúcar, é comum utilizar a queima da palhada para facilitar a colheita. A prática das queimadas na agricultura ocasiona impactos sobre o solo, como aumento a susceptibilidade à erosão, redução das substâncias necessárias à nutrição das plantas, perda de fertilidade e, conseqüentemente,

queda na produtividade das lavouras (PEREIRA et al., 2009), sobre o clima e a atmosfera, já que os gases traços e aerossóis liberados pela queima de biomassa interagem com a radiação eletromagnética (REM) e ocasionam a absorção e espalhamento da mesma provocando alterações significativas no balanço de radiação e nos fluxos de calor latente e sensível (KAUFMAN et al., 1990) e sobre a saúde, principalmente com o aumento da incidência de casos de doenças respiratórias, como a asma (RIBEIRO, 2008).

Visando acabar com a prática da queimada pré-colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, em 2002 foi aprovada a Lei Estadual 11.241, que estipulou um cronograma para a eliminação da queima nos canaviais, com prazo final em 2021 para áreas mecanizáveis (declividade $\leq 12\%$) e em 2031 para áreas não mecanizáveis (declividade $> 12\%$). Com o intuito de acelerar o processo de diminuição dessa queima, a Secretaria de Meio Ambiente (SMA) do Estado de São Paulo e a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA) firmaram, em agosto de 2007, um protocolo de intenções, denominado Protocolo Etanol Verde, em que a prática da queima da palha da cana-de-açúcar deve ser gradativamente reduzida até sua completa eliminação em 2017 para áreas não mecanizáveis e até 2014 em áreas mecanizáveis (SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DE SÃO PAULO, 2013).

A Figura 1 apresenta o tipo de colheita das áreas de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo nos anos de 2008 a 2011. A classe cana crua refere-se à colheita mecânica, a classe cana queima representa a colheita com o uso da queima da palhada e a classe cana bisada são as áreas em que a cana-de-açúcar não foi colhida ao fim da safra.

Conforme a Tabela 1, a porcentagem de áreas colhidas com queima vem diminuindo gradativamente desde 2006, ano em que esse tipo de informação começou a ser disponibilizada para o Estado de São Paulo pelo projeto Canasat (CANASAT, 2013). Em 2006, 65,8% da colheita em São Paulo utilizou a queimada, havendo diminuição ao longo dos anos, alcançando 34,8% em 2011. Apesar da diminuição em porcentagem, nota-se para 2010 um aumento de pouco mais de 16% em área colhida com a queima da palhada, o que pode ser explicado pela seca ocorrida

no de 2010 e a baixa umidade relativa do ar entre os meses de maio e agosto (colheita da cana-de-açúcar) de 2010, favorecendo o aumento das queimadas (AGUIAR et al., 2010).

Tabela 1- Área total (ha) e percentual de cana crua e cana queima no Estado de São Paulo nos anos de 2006 a 2011.

| Ano | Cana Crua (ha) | Cana Crua (%) | Cana Queima (ha) | Cana Queima (%) | Total (ha) |
|------|----------------|---------------|------------------|-----------------|------------|
| 2006 | 1.110.120 | 34,2 | 2.131.990 | 65,8 | 3.242.110 |
| 2007 | 1.764.992 | 46,6 | 2.025.448 | 53,4 | 3.790.440 |
| 2008 | 1.924.075 | 49,1 | 1.997.630 | 50,9 | 3.921.705 |
| 2009 | 2.266.403 | 55,6 | 1.810.531 | 44,4 | 4.076.934 |
| 2010 | 2.627.025 | 55,6 | 2.101.110 | 44,4 | 4.728.135 |
| 2011 | 3.125.619 | 65,2 | 1.670.521 | 34,8 | 4.796.140 |

Ainda de acordo com Aguiar et al. (2011), a diminuição da queimada pré-colheita em porcentagem entre 2006 e 2011 está relacionada com a criação do Protocolo Etanol Verde, que se mostra positivo no sentido de incentivar a adoção da colheita mecânica da cana-de-açúcar, em

especial sobre as áreas de expansão do cultivo, sendo que todas as Regiões Administrativas (RAs) do Estado de São Paulo (Figura 2) apresentaram aumento na proporção de área colhida mecanicamente entre 2006 e 2011, merecendo destaque a RA de Barretos, com 41,7 % de cana crua em 2006 e 63,9% em 2011 e a RA de Presidente Prudente, que apresentou o menor incremento em proporção de cana crua (21,3% em 2006 e 50,2% em 2011).

3. DADOS UTILIZADOS

Os produtos derivados de dados de sensoriamento remoto disponíveis para estudos relacionados às queimadas são divididos em dois grandes grupos: os produtos de fogo ativo, que monitoram a ocorrência de queimadas com base na detecção de anomalias termais, e os produtos de cicatriz de queimada, que detectam áreas onde ocorreram queimadas (LAUK e ERB, 2009).

Atualmente, estão disponíveis de forma

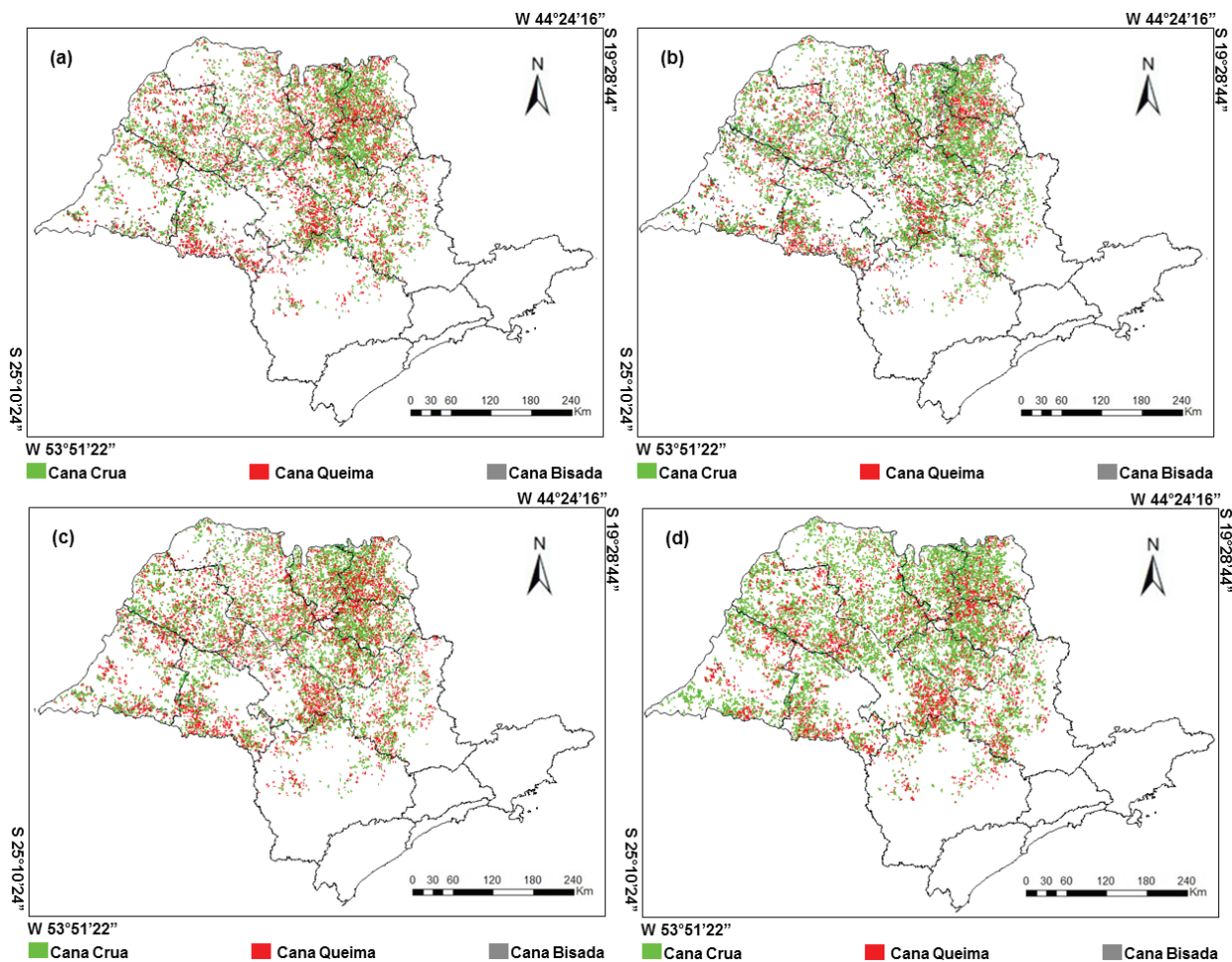


Fig. 1 - Tipo de colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo para os anos de 2008 (a), 2009 (b), 2010 (c) e 2011 (d).

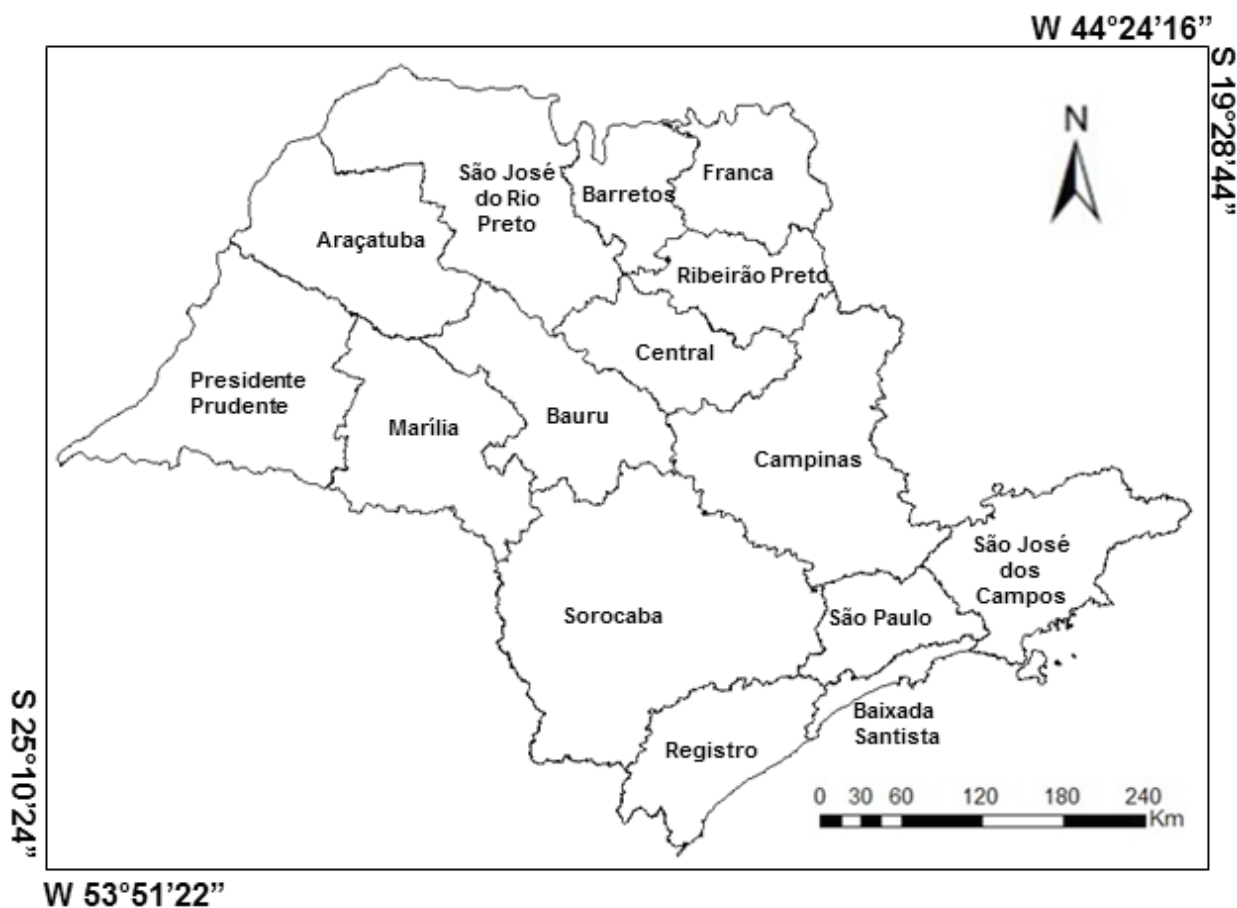


Fig. 2 - Regiões Administrativas (RAs) do Estado de São Paulo.

gratuita produtos de sensores a bordo de satélites de órbita polar, como o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) e o *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) e sensores a bordo de satélites geostacionários, como o *Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager* (SEVIRI) e o *Geostationary Operational Environmental Satellite Imager* (GOES Imager) que trazem a informação da localização espacial dos focos de queimada detectados.

3.1 MODIS/Terra-Aqua

O sensor MODIS está a bordo dos satélites Terra e Aqua, de órbita polar a uma altitude de 700 km, e possui uma resolução radiométrica de 12 bits, operando em 36 canais espectrais em comprimentos de onda entre 0,4µm e 14,4µm com uma resolução espacial que varia de 250 metros, 500 metros ou 1000 metros dependendo do produto em questão e resolução temporal de 1 a 2 dias. Esse sensor foi configurado para fornecer dados sobre a dinâmica da biosfera terrestre visando à compreensão dos processos

que ocorrem na superfície da terra, nos oceanos e na atmosfera inferior, causadas por atividades antrópicas ou pela própria natureza (JUSTICE et al., 2002).

Os produtos de detecção de anomalias térmicas do MODIS (MOD14 e MYD14) fornecem a localização de focos de calor, baseado na emissão dos alvos nos comprimentos de onda centrados em 4µm e 11µm a uma resolução espacial nominal de 1 km (ICHOKU et al., 2012), sendo que seu algoritmo de detecção utiliza uma árvore de decisão baseado nestas duas faixas espectrais e gera interpretações com vários níveis de confiança, de acordo com os ângulos de incidência da fonte e de observação do sensor (PIROMAL et al., 2008).

3.2 AVHRR /NOAA

O sensor AVHRR, a bordo dos satélites *National Oceanic Atmospheric Administration* (NOAA), é bastante utilizado para estudos de clima e meteorologia, vegetação e queimadas. O sistema encontra-se em órbita polar a aproximadamente 835 km de altitude, o que

permite uma resolução temporal de cerca de 1 dia. Esse sensor opera nas faixas do visível e infravermelho do espectro eletromagnético, possuindo seis canais espectrais. Cada canal possui uma resolução espacial de 1,1 km no nadir sendo que os dados são digitalizados a bordo do satélite com resolução radiométrica de 10 *bits* (FRANÇA, 2004).

O algoritmo utilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para identificação de focos nas imagens AVHRR para os anos inseridos dentro do presente estudo determina os *pixels* com queimadas a partir dos valores de nível de cinza, sem efetuar sua conversão para medidas de reflectância e temperatura, sendo essa opção decorrente do fato de a maioria dos *pixels* de queimada apresentar saturação no canal 3 (3,6 μ m a 3,9 μ m), utilizado para a detecção dos focos, já que o mesmo coincide com o máximo de energia emitida pela queimada (SETZER et al., 2013).

3.3 SEVIRI/METEOSAT

O SEVIRI está a bordo da segunda geração de satélites geoestacionários *METEORological SATellite* (METEOSAT) a uma altitude de cerca de 36.000 km. O sensor consiste de um radiômetro imageador que obtêm dados a cada 15 minutos, tornando-o ideal para a identificação de focos de queimada que ocorrem em um curto período, como é o caso das queimas de palhadas destinadas à colheita da cana-de-açúcar. O SEVIRI fornece dados com resolução radiométrica de 10 *bits*, estando centrado na África e Europa e operando em 12 canais espectrais localizados nas faixas espectrais do visível, infravermelho próximo e infravermelho termal, com resolução espacial de 3 km a nadir e resolução espacial média no Brasil de 6 km, podendo chegar a mais de 8 km (ROBERTS e WOOSTER, 2008).

O algoritmo de detecção de queimadas utilizado pelo SEVIRI considera que um *pixel* potencialmente contendo uma queimada é identificado a partir da diferença da temperatura de brilho entre os canais espectrais do infravermelho médio e infravermelho termal (ROBERTS e WOOSTER, 2008).

3.4 GOES Imager/GOES

O sensor GOES *Imager*, a bordo da constelação geoestacionária *Geostationary*

Operational Environmental Satellite (GOES), cobre o espectro eletromagnético em cinco bandas, do visível ao infravermelho termal, no qual as bandas centradas em 4 μ m e 11 μ m são utilizadas no algoritmo para detecção de anomalias termais (ZHANG e KONDRAGUNTA, 2008). Devido às características de sua órbita, a uma altitude de aproximadamente 35.800 km é possível a aquisição de dados a cada 30 minutos, com resolução espacial nominal de 2,3 km por 4 km e resolução radiométrica de 10 *bits*.

O *Wildfire Automated Biomass Burning Algorithm* (WFABBA) é o produto do GOES destinado à detecção de focos de queimada. Os dados disponibilizados por esse produto apresentam a hora da passagem do satélite, a longitude, a latitude, o ângulo de imageamento do satélite, o tamanho do *pixel*, a temperatura em 4 μ m e 11 μ m, a temperatura e a área do *subpixel* com fogo, a potência radiativa do fogo (FRP), o tipo de ecossistema e a característica do *pixel* (KOLTUNOV et al., 2012).

3.5 TM/LANDSAT

O sensor TM, a bordo do satélite de Landsat-5, com órbita polar a uma altitude de aproximadamente 917 km foi desenvolvido com a finalidade de fornecer suporte à pesquisa em várias áreas de interesse. O sensor possui uma resolução espacial de 30 metros nas regiões espectrais do visível, infravermelho próximo e médio e 120 metros para a banda do infravermelho termal, apresentando ainda resolução radiométrica de 8 *bits* e resolução temporal de 16 dias.

As imagens do TM foram utilizadas para avaliar a localização espacial dos focos de queimada identificados pelos sensores anteriormente descritos, ou seja, se esses focos realmente eram referentes a áreas de cana queima delimitadas pelo Projeto Canasat.

3.6 Projeto Canasat

O mapeamento das áreas de cana-de-açúcar para os anos de 2008 a 2011 foi obtido do Projeto Canasat, desenvolvido pelo INPE, em conjunto com a UNICA, com o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) e com o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA) (AGUIAR et al., 2009). A determinação das áreas de cana-de-açúcar baseia-se na classificação

digital e na interpretação visual de imagens de sensoriamento remoto orbital dos sensores *Thematic Mapper* (TM), *Enhanced Thematic Mapper* (ETM), *Couple Charged Device* (CCD) e *Linear Imaging Self-Scanner* (LISS-3).

Desde 2007, o Projeto Canasat disponibiliza o mapeamento do tipo de colheita empregada para a cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, possibilitando o monitoramento das áreas de cana crua e cana queima e a avaliação da efetividade da adoção do Protocolo Etanol Verde na antecipação do fim da prática das queimadas na colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo (AGUIAR et al., 2011).

4. METODOLOGIA

Para analisar a distribuição espacial e temporal dos focos de queimada em áreas de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo nos anos de 2008 a 2011 foram utilizados os dados anteriormente descritos. Os dados AVHRR são disponibilizados pelo banco de queimadas do INPE (<http://www.inpe.br/queimadas>), já os dados MODIS foram adquiridos no banco de dados *Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System* (LAADS Web) (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>), os dados do GOES *Imager* são do banco de dados *NOAA Geostationary Satellite Server* (<http://www.goes.noaa.gov/>), e os dados do SEVIRI foram adquiridos através da *Land Surface Analysis Satellite Applications Facility* (LAS SAF) (<http://landsaf.meteo.pt/>).

Como existem incertezas em relação à localização dos dados utilizados devido às características gerais dos sistemas sensores previamente apresentados (JESUS et al., 2011), e pretende-se relacionar os focos de queimada com as áreas de cana-de-açúcar, optou-se por criar um *buffer* de 8 km em torno das áreas de cana-de-açúcar definidas pelo mapeamento temático do Projeto Canasat para cada ano abordado, sendo a distância do *buffer* definida como um *pixel* de deslocamento em relação à menor resolução espacial, e a menor resolução espacial considerada foi de 8 km, para o SEVIRI. Outro fator a ser considerado e que motivou a utilização do *buffer* é o fato da localização espacial do foco de queimada encontrar-se no ponto central do *pixel* em que se localiza o foco, e não no seu local de ocorrência, sendo assim necessário considerar

uma área mais ampla do que apenas as áreas de cana-de-açúcar para a análise.

Com os dados da localização dos focos para cada ano, os mesmos foram cruzados com a área delimitada pelo *buffer* de cada ano a fim de obter como resultado final os focos que ocorreram somente em áreas de cana-de-açúcar entre 2008 e 2011. Os focos em áreas de cana-de-açúcar foram, então, agrupados por dia para cada sensor e calculou-se ainda o total de focos diários detectados entre 01 de janeiro de 2008 e 31 de dezembro de 2011.

A avaliação da consistência da detecção dos focos captados pelos sensores com o mapeamento temático do projeto Canasat foi realizada a partir de imagens TM/ Landsat-5 submetidas a técnicas de pré-processamento e realce (restauração, registro e confecção de composições coloridas R5G4B3). Foram sorteadas aleatoriamente 2 cenas para cada ano (Tabela 2), sendo que no sorteio considerou-se apenas cenas com órbita/ponto em que existe o cultivo de cana-de-açúcar.

Tabela 2: Data e órbita/ponto das cenas TM/ Landsat-5 utilizadas para a avaliação da consistência dos focos de queimada com o mapeamento temático do tipo de colheita do Projeto Canasat.

| Data | Órbita | Ponto |
|------------|--------|-------|
| 24/07/2008 | 220 | 074 |
| 24/09/2008 | 222 | 074 |
| 26/08/2009 | 222 | 075 |
| 29/10/2009 | 222 | 076 |
| 22/08/2010 | 221 | 075 |
| 16/09/2010 | 220 | 075 |
| 19/09/2011 | 220 | 074 |
| 26/09/2011 | 221 | 075 |

A análise da distribuição espacial do número total de focos anual ocorreu com o uso do estimador de densidade por Kernel, implementado no SPRING (CÂMARA et al., 1996). O estimador de densidade por Kernel aplica uma vizinhança ao redor de cada ponto amostral, correspondente a um raio de influência, e aplica uma função matemática correspondente a 1 na área dentro da vizinhança e 0 na posição fora da vizinhança, sendo o valor de cada célula a soma dos valores de Kernel sobrepostos, divididos pela área de cada raio de

influência(SOUZA et al., 2013). A largura de banda utilizada para o estimador de densidade foi definida como duas vezes o tamanho do *pixel* de menor resolução espacial, ou seja, 16 km.

A partir da série temporal criada com a distribuição diária de focos de cada sistema sensor durante o período de estudo abordado foi aplicada a Transformada de *Wavelet* para verificar a frequência do ciclo das queimadas. A análise de séries temporais por meio Transformada de *Wavelet* permite a avaliação de um fenômeno no domínio da frequência, sendo que a mesma consiste um método de decomposição de variâncias provenientes de séries temporais que possibilita decompor e recompor dados em diferentes escalas temporais, no domínio da frequência, onde cada escala é representada por uma frequência específica (TORRENCE e WEBSTER, 1999).

Esse procedimento foi realizado na plataforma *Interface Description Language* (IDL) através do pacote *Wavelet Toolkit* do *software* ENVI 4.8 (RSI, 2008) utilizando o modelo Morlet de ordem 3, com significância global de 5%.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os focos de queimada detectados sobre áreas de cana-de-açúcar, obtidos pelo cruzamento dos focos no Estado de São Paulo com os *buffers* das áreas de cana-de-açúcar, foram avaliados com o objetivo de verificar sua consistência com a classe cana queima do mapeamento temático do Projeto Canasat, utilizando cenas do TM/Landsat-5 em regiões onde existe o cultivo da cana-de-açúcar. A Figura 3 exemplifica a avaliação para uma região compreendida dentro da cena referente à órbita-ponto 220/75 do TM, para os focos de queimada identificados pelo SEVIRI.

Nota-se pela Figura 3 que os focos de queimada, nesse caso do SEVIRI, mas que demonstram os resultados obtidos pela avaliação com os outros sensores, estão localizados próximos a áreas de cana-de-açúcar, porém como o algoritmo de detecção de focos dos sensores abordados atribui cada foco ao ponto central do *pixel* em que ele está contido, alguns focos acabam por se situar fora de áreas da cultura, apesar de serem referentes à queima da cana-de-açúcar para a colheita.

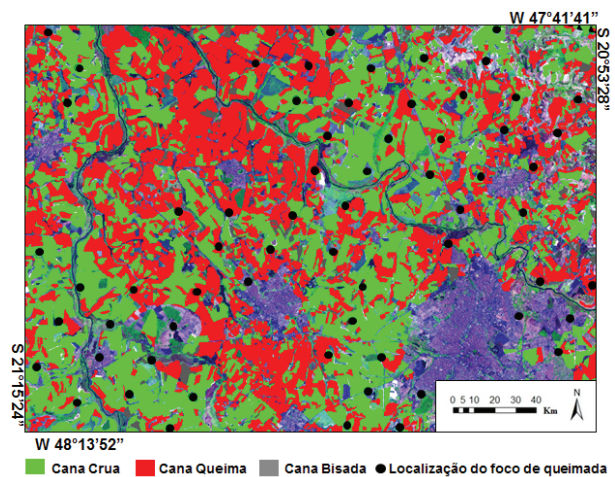


Fig. 3 - Avaliação dos focos de queimada identificados pelo SEVIRI em um segmento da área de estudo em 16/09/2010 a partir de uma cena TM/Landsat-5 órbita-ponto 220/075.

A Tabela 3 apresenta o total de focos detectados em cada ano nas áreas de cana-de-açúcar, para cada sensor. Nota-se para o sensor MODIS uma concordância com os dados do projeto Canasat, já que houve uma diminuição do número de focos entre 2008 e 2009, com maior número de focos detectados no ano de 2010, ano analisado em que houve a maior área colhida com queima (CANASAT, 2013) e uma queda em 2011. Para o AVHRR, houve um aumento no ano de 2009 em relação à 2008, um aumento expressivo em 2010 e, novamente, uma diminuição em 2011.

Tabela 3: Total de focos de queimada detectados em áreas de cana-de-açúcar por sensor entre 2008 e 2012.

| Sensor Ano | MODIS | AVHRR | SEVIRI | GOES Imager |
|---------------|-------|-------|--------|----------------|
| 2008 | 4963 | 4806 | 50547 | 377 |
| 2009 | 4015 | 5388 | 45319 | 837 |
| 2010 | 7099 | 9020 | 80060 | 37 |
| 2011 | 4851 | 6898 | 45389 | 1841 |
| Total | 20928 | 26112 | 221315 | 3092 |

Em relação aos sensores a bordo de satélites de órbita geoestacionária, o SEVIRI mostrou grande eficiência na detecção de focos de queimada em áreas de cana-de-açúcar, apresentando total de focos detectados no período de 4 anos mais de 10 vezes maior que o MODIS e aproximadamente 8,5 vezes maior que o AVHRR, sendo necessário considerar

que devido à resolução temporal de 15 minutos do SEVIRI o sensor pode ter detectado uma mesma queimada para a colheita da cana-de-açúcar mais de uma vez, já que a queima da palhada ocorre rapidamente, levando de 10 a 15 minutos para consumir um talhão de cerca de 5 hectares (MARINHO e KIRCHHOFF, 1991). Nota-se ainda que o SEVIRI seguiu o padrão do MODIS, com maior número de focos em 2010 e diminuição entre 2008 e 2009. Já o GOES *Imager* não se mostrou eficiente na detecção de focos em áreas de cana-de-açúcar, chegando a detectar apenas 37 focos no ano em que se esperava a maior incidência de queimadas. Esse resultado pode ter sido causado pelo algoritmo de detecção de focos de queimada do GOES *Imager*, que não foi eficiente na detecção de focos em áreas pequenas em relação à sua resolução espacial, como um talhão de cana-de-açúcar submetido à queimada pré-colheita. Além do algoritmo de detecção de focos, outros fatores que podem dificultar a detecção de focos de queimada por qualquer sensor são o horário divergente entre a queimada e a passagem do satélite, a presença de nuvens no momento do imageamento e, muitas vezes, da fumaça densa originada das próprias queimadas, impedindo a detecção dos focos sobre elas (FRANÇA, 2004).

Os mapas de densidade de Kernel do número de focos de queimada totais anuais em áreas de cana-de-açúcar considerando uma largura de banda de 16 km de cada sensor para o Estado de São Paulo nos anos de 2008 a 2011 são apresentados na Figura 4. Para o sensor MODIS, no ano de 2010 houve uma maior densidade de focos de queimada, chegando a mais de 24 focos, o que está de acordo com os dados do Projeto Canasat apresentados na Tabela 1. O MODIS realiza duas passagens sobre um mesmo ponto por dia, portanto esse tempo de revisita permite que eventos dinâmicos, como a queima dos talhões de cana-de-açúcar para a colheita, não sejam identificados pelo sensor.

O AVHRR, assim como o MODIS, registrou uma densidade máxima de 24 focos, havendo semelhança com a distribuição de focos detectados com o MODIS. Podem-se notar a partir da análise dos mapas de densidade para o sensor AVHRR os focos de queimada acompanhando expansão da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo em

direção à Oeste e Centro-Oeste, especialmente em 2010. Apesar do menor número total de focos detectados e menor densidade quando comparados com sensores a bordo de satélites de órbita geoestacionária, o MODIS e o AVHRR permitem que focos de queimada menores em relação à resolução espacial de um *pixel* do sensor sejam detectados, sendo essa uma vantagem dos sensores a bordo de órbita polar (FREEBORN et al., 2011).

Em relação aos sensores a bordo de órbita geoestacionária, o SEVIRI apresentou uma densidade de mais de 275 em 2010, comprovando sua eficácia para a detecção de focos de queimada. É possível notar a partir dos mapas de densidade do SEVIRI que as áreas mais densas correspondem à região em que tradicionalmente se concentra a maior produção da cana-de-açúcar, a região Norte do Estado de São Paulo, assim como a expansão da cultura em direção ao Oeste.

O GOES *Imager*, apesar de contar com uma resolução temporal de 30 minutos, identificou uma quantidade mínima de focos de queimada quando comparando ao SEVIRI e aos sensores em órbita polar, o que, conseqüentemente, tornou os mapas de densidade do GOES *Imager* não representativos do fenômeno em questão. Apesar disso, nota-se que em 2011, ano com o maior número de focos detectados para este sensor, os focos estavam localizados em uma área relativamente próxima, o que ocasionou a densidade máxima de 36 focos para a largura de banda de 16 km.

Em relação às Regiões Administrativas do Estado de São Paulo (Figura 2), as que apresentaram o maior número total de focos de queimada foram as de São José do Rio Preto, Ribeirão Preto e Campinas (Tabela 4), algumas das mais tradicionais das RAs em cultivo da cana-de-açúcar. Quanto ao total anual de focos, nota-se um incremento significativo em 2010, ano analisado com maior expansão do cultivo, nas RAs de Araçatuba, Bauru e Presidente Prudente, sendo que essas RAs são um vetor de crescimento do cultivo da cana-de-açúcar (CANASAT, 2013).

Para a densidade média de focos por RA considerando a largura de banda de 16 km, nota-se que a maior densidade média para o MODIS ocorreu na RA Central, com exceção do ano

de 2009, em que a maior densidade média foi encontrada na RA de Ribeirão Preto. Para o AVHRR, a RA de Ribeirão Preto apresentou a maior densidade média em 2008 e 2011 e ainda estava entre as maiores densidades médias em

2009 e 2010. Ainda para o AVHRR, em 2010 a maior densidade média foi encontrada no Norte de São Paulo, mais especificamente na RA de Barretos. Já em 2009 a RA de Bauru apresentou a maior densidade média.

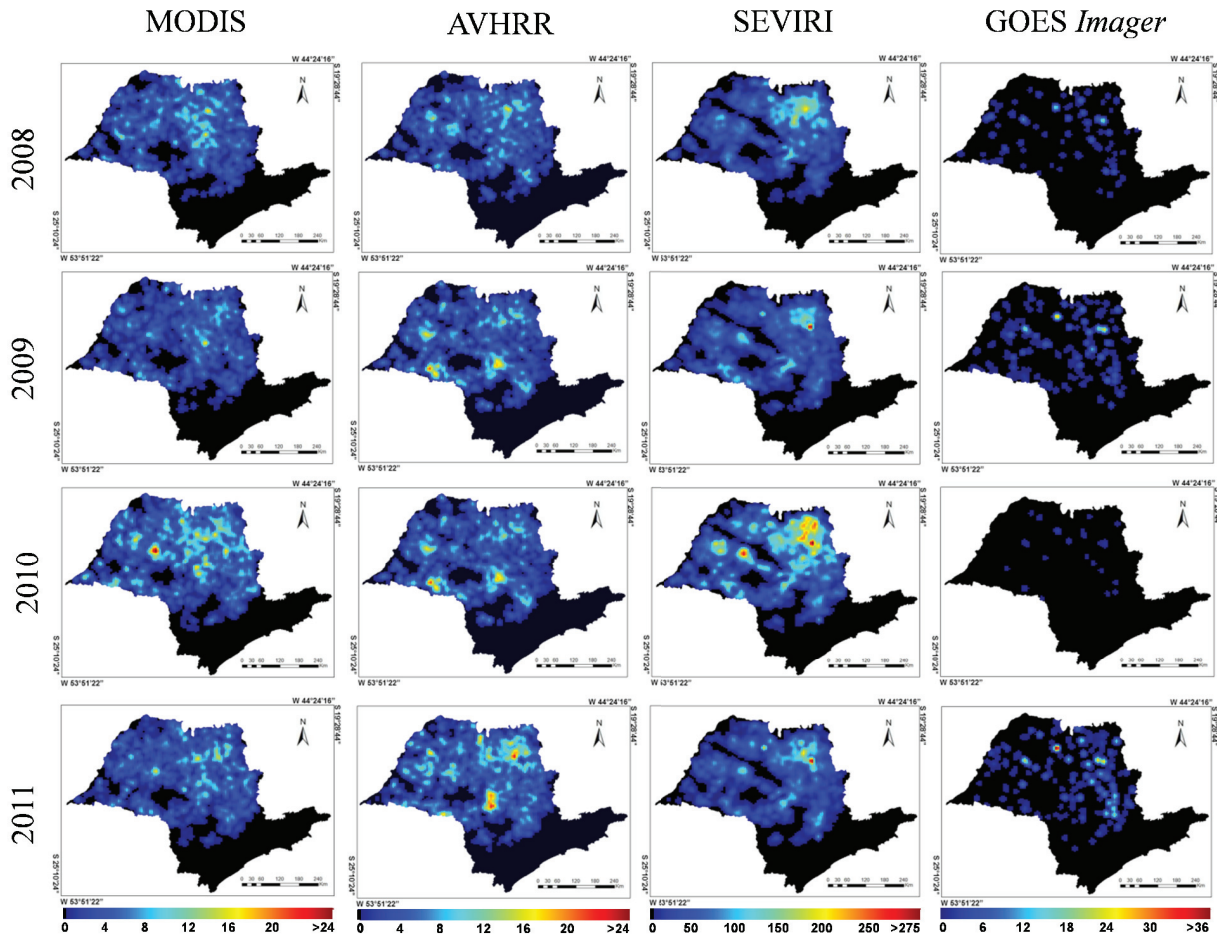


Fig. 4 - Mapas de densidade de focos de queimada detectados pelos sensores MODIS, AVHRR, SEVIRI e GOES *Imager* construídos a partir do estimador de densidade por Kernel com uma largura de banda de 16 km para o Estado de São Paulo nos anos de 2008 a 2011.

Quanto aos sensores a bordo de satélites de órbita geostacionária, apesar do desempenho baixo do GOES *Imager*, verificou-se um padrão presente em todos os anos. A RA que apresentou a maior densidade média foi a de Ribeirão Preto, chegando a atingir mais de 90 focos de densidade média para o sensor SEVIRI em 2010.

Em relação às densidades médias mínimas, encontrou-se um padrão para todos os sensores, já que a RA de Sorocaba apresentou as menores densidades médias mínimas, com exceção do GOES *Imager* em 2009. Esse fato pode estar relacionado com o Protocolo Etanol Verde, uma vez que a RA de Sorocaba apresentou um aumento de área cultivada de cana-de-açúcar

de mais de 47% entre 2008 e 2011 (CANASAT, 2013), e as novas áreas de cultivo tendem a adotar a colheita mecânica a fim de antecipar os prazos estabelecidos pelo Protocolo Etanol Verde.

Buscando-se avaliar a distribuição temporal dos focos de queimada no Estado de São Paulo, aplicou-se a Transformada de *Wavelet* na série temporal diária de focos. (Figura 5). Na Figura 5, o eixo X indica o tempo (diário), que corresponde ao período de dias entre 2008 e 2011, o eixo y representa a escala de variação temporal (inverso da frequência) e a escala de cores representa a potência, valor absoluto ao quadrado dos coeficientes gerados pela Transformada de

Wavelet, na qual o peso de cada ponto mede a contribuição de cada dado na variabilidade total da série (PEREIRA et al., 2010).

Tabela 4: Número de focos e densidade média de Kernel dos focos detectados pelos sensores MODIS, AVHRR, SEVIRI e GOES *Imager* para as RAs do Estado de São Paulo entre 2008 e 2011. As RAs onde não existe o cultivo da cana-de-açúcar não estão presentes na tabela.

| Sensor | Ano | Variáveis | Araçatuba | Barretos | Bauru | Campinas | Central | Franca | Marília | Presidente Prudente | Ribeirão Preto | São José do Rio Preto | Sorocaba |
|--------------------|----------|-----------|-----------|----------|-------|----------|---------|--------|---------|---------------------|----------------|-----------------------|----------|
| MODIS | 2008 | Focos | 566 | 371 | 412 | 478 | 625 | 365 | 347 | 413 | 362 | 828 | 196 |
| | | D. Média | 2,81 | 3,83 | 2,30 | 1,63 | 5,12 | 3,14 | 1,73 | 1,66 | 3,31 | 3,06 | 0,44 |
| | 2009 | Focos | 511 | 262 | 304 | 438 | 492 | 344 | 384 | 309 | 274 | 542 | 155 |
| | | D. Média | 2,55 | 2,77 | 1,67 | 1,51 | 3,97 | 2,94 | 1,90 | 1,22 | 2,50 | 1,99 | 0,34 |
| | 2010 | Focos | 950 | 476 | 717 | 797 | 657 | 532 | 435 | 555 | 609 | 1098 | 273 |
| | | D. Média | 4,75 | 4,76 | 4,03 | 2,78 | 5,34 | 4,62 | 2,14 | 2,19 | 5,68 | 4,01 | 0,59 |
| 2011 | Focos | 568 | 332 | 443 | 613 | 500 | 382 | 345 | 358 | 406 | 703 | 201 | |
| | D. Média | 2,85 | 3,29 | 2,47 | 2,11 | 4,08 | 3,29 | 1,67 | 1,42 | 3,75 | 2,60 | 0,44 | |
| AVHRR | 2008 | Focos | 609 | 350 | 482 | 491 | 474 | 371 | 394 | 365 | 437 | 605 | 228 |
| | | D. Média | 3,02 | 3,64 | 2,70 | 1,65 | 3,90 | 3,24 | 1,96 | 1,44 | 4,00 | 2,24 | 0,50 |
| | 2009 | Focos | 642 | 312 | 693 | 573 | 358 | 367 | 710 | 554 | 335 | 534 | 310 |
| | | D. Média | 3,18 | 3,21 | 3,91 | 1,92 | 2,87 | 3,17 | 3,54 | 2,17 | 3,09 | 1,98 | 0,69 |
| | 2010 | Focos | 967 | 673 | 998 | 952 | 702 | 686 | 896 | 912 | 678 | 878 | 678 |
| | | D. Média | 4,78 | 6,92 | 5,63 | 3,19 | 5,62 | 5,92 | 4,47 | 3,57 | 6,25 | 3,25 | 1,51 |
| 2011 | Focos | 832 | 454 | 845 | 667 | 483 | 600 | 530 | 611 | 603 | 899 | 374 | |
| | D. Média | 4,15 | 4,57 | 4,70 | 2,28 | 3,87 | 5,19 | 2,53 | 2,40 | 5,61 | 3,26 | 0,84 | |
| SEVIRI | 2008 | Focos | 4292 | 4422 | 4149 | 4808 | 4956 | 5385 | 3758 | 3080 | 6768 | 7205 | 1724 |
| | | D. Média | 21,28 | 44,63 | 23,45 | 16,39 | 39,86 | 46,81 | 18,82 | 12,26 | 62,69 | 26,73 | 3,88 |
| | 2009 | Focos | 4375 | 2742 | 4897 | 4876 | 3704 | 4021 | 5365 | 3778 | 4706 | 4889 | 1966 |
| | | D. Média | 21,88 | 27,60 | 27,56 | 16,69 | 30,05 | 34,86 | 26,73 | 14,99 | 43,73 | 18,14 | 4,45 |
| | 2010 | Focos | 8193 | 5323 | 6656 | 8200 | 7606 | 9064 | 5707 | 5777 | 9656 | 10955 | 2923 |
| | | D. Média | 41,02 | 54,31 | 37,37 | 28,25 | 61,64 | 79,33 | 28,32 | 22,87 | 90,24 | 40,58 | 6,56 |
| 2011 | Focos | 4327 | 3126 | 4255 | 4582 | 3874 | 4408 | 3411 | 3040 | 5881 | 6054 | 2431 | |
| | D. Média | 21,53 | 31,43 | 23,99 | 15,54 | 31,25 | 38,07 | 16,90 | 12,03 | 55,44 | 22,42 | 5,41 | |
| GOES <i>Imager</i> | 2008 | Focos | 58 | 37 | 9 | 41 | 29 | 9 | 8 | 42 | 82 | 58 | 4 |
| | | D. Média | 0,28 | 0,38 | 0,05 | 0,14 | 0,22 | 0,07 | 0,04 | 0,16 | 0,80 | 0,20 | 0,009 |
| | 2009 | Focos | 125 | 56 | 65 | 88 | 90 | 29 | 63 | 38 | 147 | 108 | 28 |
| | | D. Média | 0,63 | 0,57 | 0,38 | 0,30 | 0,74 | 0,24 | 0,31 | 0,14 | 1,45 | 0,38 | 0,6 |
| | 2010 | Focos | 3 | 4 | 1 | 3 | 3 | 1 | 4 | 1 | 5 | 12 | 0 |
| | | D. Média | 0,01 | 0,04 | 0,006 | 0,01 | 0,02 | 0,007 | 0,02 | 0,004 | 0,05 | 0,04 | 0 |
| 2011 | Focos | 128 | 95 | 71 | 829 | 135 | 67 | 39 | 24 | 234 | 183 | 36 | |
| | D. Média | 0,66 | 1,01 | 0,41 | 1,16 | 1,09 | 0,60 | 0,20 | 0,09 | 2,17 | 0,70 | 0,08 | |
| Total 2008 | | | 5525 | 5180 | 5052 | 5818 | 6084 | 6130 | 4507 | 3900 | 7649 | 8696 | 2152 |
| Total 2009 | | | 5653 | 3372 | 5959 | 5975 | 4644 | 4761 | 6522 | 4679 | 5462 | 6073 | 2459 |
| Total 2010 | | | 10113 | 6476 | 8372 | 9952 | 8968 | 10283 | 7042 | 7245 | 10948 | 12943 | 3874 |
| Total 2011 | | | 5855 | 4007 | 5614 | 6691 | 4992 | 5457 | 4325 | 4033 | 7124 | 7839 | 3042 |
| Total | | | 27146 | 19035 | 24997 | 28436 | 24688 | 26631 | 22396 | 19857 | 31183 | 35551 | 11527 |

Percebe-se a semelhança no padrão de variação temporal dos focos identificados pelos sensores AVHRR, SEVIRI e MODIS. A maior quantidade de focos de queimada foi registrada pelo SEVIRI, chegando a mais de 1500 focos em um único dia no ano de 2010. Para o AVHRR, a variação do número de focos de queimada segue anualmente a época de colheita da cana-de-açúcar, com a maior quantidade de focos compreendendo o período de abril a setembro, havendo um ciclo aproximadamente a cada 256 dias e com a maior variação ocorrendo no ano

de 2010 (área com coloração vermelha).

Para os espectros de potência do SEVIRI e do MODIS há também um padrão no ciclo de aproximadamente 256 dias, havendo a maior variação em 2010 e uma segunda maior variação no ano de 2008. A área contida em 5% de significância no espectro de potência (linha branca) é semelhante à obtida para o AVHRR, mostrando a semelhança no padrão de distribuição temporal dos focos de queimada no Estado de São Paulo.

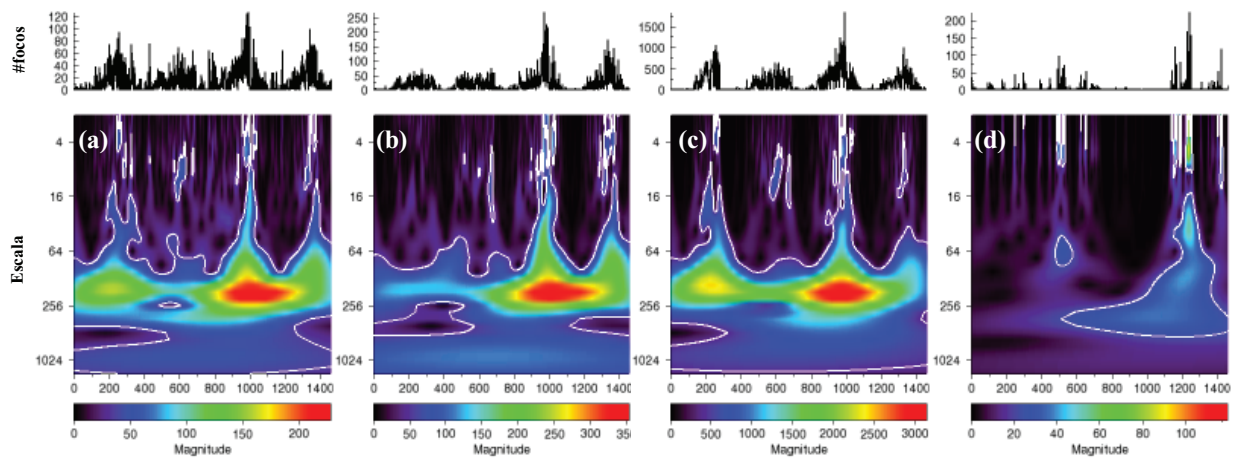


Fig. 5 - Espectros de potência de *Wavelet* da série temporal diária nos anos de 2008 a 2011 gerados a partir dos focos de queimada detectados pelos sensores MODIS (a), AVHRR (b), SEVIRI (c) e GOES *Imager* (d). Na parte superior da figura encontra-se a distribuição do número total de focos diários para cada sensor.

Para o GOES *Imager*, há um padrão diferente dos demais na variabilidade do número de focos no período abordado, com maior variação detectada de focos ocorrendo em 2011. Essa discordância com os demais resultados pode ser devido à menor quantidade de focos identificados por seu algoritmo de detecção de focos de queimada, resultando em um padrão diferente do obtido para os demais sensores, não representando satisfatoriamente a distribuição temporal dos focos de queimada na área de estudo.

6. CONCLUSÕES

De maneira geral, os focos de queimada identificados pelos sistemas sensores avaliados estavam relacionados com áreas de cana-de-açúcar. Visando atender ao Protocolo Etanol Verde, verifica-se que apesar da diminuição da proporção de áreas de colheita com queimada ainda ocorre, em alguns anos, um aumento na área total colhida com queimada. A redução da proporção de áreas colhidas com queimadas também se deve à expansão da cultura no Estado, sendo que as novas áreas de cultivo utilizam, predominantemente, a colheita mecânica da cana-de-açúcar a fim de antecipar os prazos previstos no Protocolo Etanol Verde. O SEVIRI, apesar da resolução espacial mais grosseira entre os sensores abordados, mostrou-se como o mais eficiente para a detecção de focos de queimada em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, fato que deve ser atribuído à sua resolução temporal de

15 minutos e seu algoritmo de detecção de focos de queimada.

Novas metodologias aplicadas ao monitoramento de queimadas podem ser desenvolvidas integrando-se dados de sensores a bordo de satélites de órbita geoestacionária (maior repetitividade) com dados sensores a bordo de satélites de órbita polar (resolução espacial mais fina), o que parece ser o caminho mais correto para detecção de focos em áreas de queimada de cana-de-açúcar. As vantagens de cada tipo de sistema sensor devem ser aproveitadas, criando-se um sistema de monitoramento de focos de queimada mais preciso.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao apoio financeiro das agências CAPES, CNPq e FAPESP através da concessão de bolsas de estudo aos autores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; FEITOSA, F. F.; GONÇALVES, F. G.; RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T. Análise espacial da colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo: a influência da precipitação. In: XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Florianópolis, SC, 2007. **Anais...** São José dos Campos: Inpe, 2007. 7p.

AGUIAR, D. A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T.; SUGAWARA, L. M.; FREITAS, R. M. Avaliação da conversão do uso e ocupação do solo para cana-de-açúcar utilizando imagens

- de sensoriamento remoto. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Natal, RN, 2009. **Anais...** São José dos Campos: Inpe, 2009. 8p.
- AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B. F. T.; SILVA, W. F.; ADAMI, M.; MELLO, M. P. Remote sensing images in support of environmental protocol: monitoring the sugarcane harvest in São Paulo, Brazil. **Remote Sensing**, v.3, n.12, p. 2682-2703, 2011.
- ANDREAE, M. O.; MERLET, P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. **Global Biogeochemistry Cycles**, v. 4, n.15, p. 955-966, 2001.
- CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computer and Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.
- CANASAT: mapeamento da cana via imagens de satélite de observação da terra. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat>. Acesso em: 07 abr. 2013.
- FRANÇA, H. Identificação e mapeamento de cicatrizes de queimadas com imagens AVHRR/NOAA. In: FERREIRA, N. J. (coord.). **Aplicações ambientais brasileiras dos satélites NOAA e TIROS-N**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. p. 57-78.
- FREEBORN, P. H.; WOOSTER, M. J.; ROBERTS, G. Addressing the spatiotemporal sampling design of MODIS to provide estimates of the fire radiative energy emitted from Africa. **Remote Sensing of Environment**, v.115, n.2, p. 475-489, 2011.
- HANTSON, S.; PADILLA, M.; CORTI, D.; CHUVIECO, E. Strengths and weaknesses of MODIS hotspots to characterize global fire occurrence. **Remote Sensing of Environment**, v.131, n.1, p. 152-159, 2013.
- ICHOKU, C.; GIGLIO, L.; WOOSTER, M. J.; REMER, L. A. Global characterization of biomass-burning patterns using satellite measurements of fire radiative energy. **Remote Sensing of Environment**, v.112, n.6, p. 2950-2962, 2008.
- ICHOKU, C.; KAHN, R.; CHIN, M. Satellite contributions to the quantitative characterization of biomass burning for climate modeling. **Atmospheric Research**, v.111, p. 1-28, 2012.
- JESUS, S. C.; SETZER, A. W.; MORELLI, F. Validação de focos de queimadas no Cerrado em imagens TM/Landsat-5. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Curitiba, PR, 2011. **Anais...** São José dos Campos: Inpe, 2009. 8 p.
- JUSTICE, C. O.; GIGLIO, L.; KORONTZI, S.; OWENS, J.; MORISETTE, J. T.; ROY, D. The MODIS fire products. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 2, p. 244-262, 2002.
- KAISER, J. W.; HEIL, A.; ANDREAE, M. O.; BENEDETTI, A.; CHUBAROVA, N.; JONES, L.; MORCRETTE, J. J.; RAZINGER, M.; SCHULTZ, M. G.; SUTTIE, M.; VAN DER WERF, G. R. Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power. **Biogeosciences**, v.9, n.1, p. 527-554, 2012.
- KAUFMAN, Y. J.; TUCKER, C. J.; FUNG, I. Remote Sensing of Biomass Burning in the Tropics. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. D7, p. 9927-9939, 1990.
- KOLTUNOV, A.; USTIN, S. L.; PRINS, E. M. On timeliness and accuracy of wildfire detection by the GOES WF-ABBA algorithm over California during the 2006 fire season. **Remote Sensing of Environment**, v. 127, p. 194-209, 2012.
- LAUK, C.; ERB, K. H. Biomass consumed in anthropogenic vegetation fires: Global patterns and processes. **Ecological Economics**, v.69, n.2, p. 301-309, 2009.
- MARINHO, E. V. A.; KIRCHHOFF, V. W. J. H. Projeto fogo: um experimento para avaliar efeitos das queimadas de cana-de-açúcar na baixa atmosfera. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.9, p.107-119. 1991.
- PEREIRA, G.; CARDOZO, F. S.; MORAES, E. C.; PRADO, B. R.; SILVA, G. B. S.; ARAI, E. Estudo preliminar do impacto do cultivo da cana-de-açúcar: alterações no albedo e liberação de energia radiativa através das queimadas. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Natal,

- RN, 2009. **Anais...**, São José dos Campos: Inpe, 2009. 7 p.
- PEREIRA, L. O.; CARDOZO, F. S.; MOURA, Y. M.; FONSECA, L. M. G.; PEREIRA, G.; MORAES, E. C. Delimitação das áreas alagadas do Pantanal a partir da análise por Componentes Principais e Transformada Wavelet. In: 3º SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS DO PANTANAL, Cáceres, MT, 2010. **Anais...** São José dos Campos: Inpe, 2010. 10 p.
- PIROMAL, R. A. S.; RIVEIRA-LOMBARDI, R. J.; SHIMABURURO, Y.E.; FORMAGGIO, A. R.; KRUG, T. Utilização de dados MODIS para a detecção de queimadas na Amazônia. **Acta Amazonica**, v.38, n.1, p. 77-84, 2008.
- RIBEIRO, H. Queimadas de cana-de-açúcar no Brasil: efeitos à saúde respiratória. **Revista Saúde Pública**, v. 42, n. 2. p. 370-376, 2008.
- ROBERTS, G. J.; WOOSTER, M. J. Fire detection and fire characterization over Africa using Meteosat SEVIRI. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.46, n.4, p. 1200-1218, 2008.
- RSI. Environment for Visualizing Images - ENVI. ver. 4.8. Boulder, CO, USA: ITT Industries. 2008.
- RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using Landsat data. **Remote Sensing**, v.2, n.1, p. 1057-1076, 2010.
- SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO (SMA-SP). Eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar. 2009. Disponível em: <http://www.sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam2/default.aspx?idPagina=123>. Acesso em: 03 mar. 2013.
- SETZER, A. W.; SOUZA, P. A. L.; MORELLI, F. Modificação do algoritmo de focos de queima AVHRR do INPE e sua avaliação com um método dinâmico. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Foz do Iguaçu, PR, 2013. **Anais...**, São José dos Campos: Inpe, 2013. 6 p.
- SOUZA, N. P.; SILVA, E. M. G. C.; TEIXEIRA, M. D.; LEITE, L. R.; REIS, A. A.; SOUZA, L. N.; JUNIOR, F. W. A.; REZENDE, T. A. Aplicação do Estimador de densidade Kernel em unidades de conservação na bacia do Rio São Francisco para análise de focos de desmatamento e focos de calor. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Foz do Iguaçu, PR, 2013. **Anais...**, São José dos Campos: Inpe, 2013. 8 p.
- TORRENCE, C.; WEBSTER, P. Interdecadal changes in the ENSO-Monsoon system. **Journal of Climate**, v.12, n. 1 p.2679-2690, 1999.
- VADREVU, K. P.; ELLICOTT, E.; BADARINATH, K. V. S.; VERMOTE, E. MODIS derived fire characteristics and aerosol optical depth variations during the agricultural residue burning season, north India. **Environmental Pollution**, v.159, n.6, p. 1560-1569, 2011.
- ZHANG, X.; KONDRAGUNTA, S. Temporal and spatial variability in biomass burned areas across the USA derived from the GOES fire product. **Remote Sensing of Environment**, v.112, n.6, p.2886-2897, 2008.