

INFLUÊNCIA DA QUEIMA DE CANA-DE-AÇÚCAR SOBRE A TRANSMISSIVIDADE ATMOSFÉRICA DA RADIAÇÃO UV EM BOTUCATU/SP/BRASIL

Érico Tadao Teramoto – ericoengineer@hotmail.com

João Francisco Escobedo – escobedo@fca.unesp.br

Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Departamento de Engenharia Rural

Resumo. O objetivo deste trabalho foi analisar a climatologia da transmissividade atmosférica da radiação UV (K_{TUV}) em Botucatu/SP/Brasil e a influência da queima de cana-de-açúcar sobre a K_{TUV} . O município de Botucatu (considerado rural) está localizado em região produtora de cana-de-açúcar e é umas poucas no Estado de São Paulo que monitora a radiação UV há mais de 10 anos. A queima de cana-de-açúcar no estado de São Paulo é realizada durante o período de maio a novembro com o objetivo de facilitar a colheita manual dos colmos. Dentre os impactos ambientais gerados pela queima de cana-de-açúcar está o aumento na concentração de aerossóis na atmosfera, alteração ambiental capaz de reduzir a K_{TUV} . A partir dos resultados observados, verificou-se a K_{TUV} em Botucatu é menor nos meses do verão (dezembro a fevereiro), em função da maior nebulosidade, e maior em abril e agosto, meses onde há a predominância de condições de céu claro. A queima da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, quando comparada aos incêndios nas regiões norte e centro-oeste do Brasil, altera pouco a profundidade óptica de aerossóis na faixa do visível (AOD_{550}) em Botucatu. Nos meses de maior frequência da queima de cana-de-açúcar na região de Botucatu, o aumento na AOD_{550} até valores próximos de 0,13 gera reduções de ~11% na K_{TUV} . De agosto a outubro, quando o aumento na AOD_{550} é causado pela queima de cana-de-açúcar e pelos incêndios em outros estados do Brasil, a redução na K_{TUV} é de até 22%.

Palavras-chave: Radiação Solar, Aerossóis, Queima de Biomassa, Frequência de Chuva.

1. INTRODUÇÃO

A cadeia de produção de açúcar e álcool possui grande importância econômica para o estado de São Paulo, porém ela também possui elevado potencial de impacto ambiental em função da queima de cana-de-açúcar durante o período de colheita (maio-novembro). Os incêndios são feitos com o objetivo de facilitar a colheita manual dos colmos e geram impactos ambientais como a redução da qualidade química e microbiológica dos solos e a morte de animais silvestres (Souza et al., 2012; Costa et al., 2013). Outro impacto ambiental importante é o aumento na concentração de aerossóis na atmosfera. Em algumas cidades do Estado de São Paulo, são registrados aumentos de até 140% na concentração de material particulado grosseiro (PM_{10}) em relação aos meses que antecedem o início do período de colheita (Allen et al. 2004; Lara et al., 2005; Codato et al., 2008).

Os aerossóis originados na queima de biomassa são capazes de influenciar o clima em relação à nebulosidade, a precipitação e a incidência de radiação solar sobre a superfície terrestre (Abel et al., 2005; Wielicki et al., 2005; Kaufmann e Koren, 2006; Xi et al., 2008; Codato et al., 2008). Isto ocorre, pois grande parte dos aerossóis atua como núcleos de condensação de nuvens (NCN) ou como elementos capazes de espalhar ou absorver a radiação solar. Aumentos na concentração de aerossóis do tipo NCN na atmosfera podem alterar as propriedades físicas e o tempo de vida das nuvens (Wielicki et al., 2005; Kaufman e Koren, 2006). No caso dos aerossóis absorvedores, em condições de céu nebuloso eles podem causar a evaporação das nuvens inibindo a ocorrência de chuvas (Warner, 1968; Ackerman et al., 2000; Lau et al., 2006). A influência dos aerossóis sobre a radiação solar pode ocorrer tanto pelo efeito direto (absorção e espalhamento) quanto indireto (alteração da nebulosidade). Dentre as componentes espectrais da radiação solar, a UV é uma das mais afetadas pelo efeito direto dos aerossóis. O aumento na concentração de aerossóis na atmosfera pela queima de biomassa pode gerar reduções de até 30% na incidência da radiação solar UV sobre a superfície terrestre (Reuder e Schwander, 1999; Madhavi et al., 2005; Kalashnikova et al., 2007). Além disto, a radiação solar UV possui notoriedade em relação à photosynthetically active radiation (PAR) e a near infrared (NIR) em função de seus efeitos nocivos sobre a biosfera (Diffey, 1991; Rosema et al., 2002; Bachelor e 2004; Agar et al, 2004; Harrison e Smith, 2009; Nazari et al., 2010).

Na literatura é divulgada a redução na incidência de radiação solar direta em cidades produtoras de cana-de-açúcar durante o período de colheita, resultado atribuído ao espalhamento da radiação nas faixas espectrais UV e PAR pelos aerossóis (Codato et al., 2008; Escobedo et al., 2012). Contudo, não há informações analisando especificamente a alteração na transmissão atmosférica da radiação solar UV. Tal informação é considerada importante diante da redução no uso da queima de cana-de-açúcar que ocorre no estado de São Paulo desde 2007, após a assinatura de um protocolo

entre o governo estadual e a UNICA (União da Indústria de Cana-de-açúcar). O protocolo exige a eliminação do uso da queima de cana-de-açúcar no estado até 2017, a fim de reduzir a poluição atmosférica durante o inverno e início da primavera. Neste contexto, há incertezas quanto às alterações que ocorrerão na transmissividade atmosférica da radiação solar UV em cidades produtoras de cana-de-açúcar até e após 2017.

A transmissividade atmosférica da radiação solar UV pode ser expressa através do índice K_{TUV} , razão entre a radiação solar UV incidente sobre a superfície terrestre e a UV extraterrestre. Sua utilização permite analisar a variação na incidência da radiação solar UV eliminando a dependência astronômica e a geográfica. Ou seja, através do índice K_{TUV} , a variação na incidência da radiação solar UV pode ser expressa apenas em função de variações nas concentrações de nuvens, aerossóis e ozônio na atmosfera.

O objetivo deste trabalho foi analisar a influência da queima de cana-de-açúcar na climatologia do K_{TUV} em Botucatu. O município está localizado na região produtora de cana-de-açúcar do estado de São Paulo e é uma das poucas que monitoram a radiação solar UV e que possui base de dados com mais de 10 anos de medições.

2. LOCAL DE ESTUDO

A cidade de Botucatu (22.85°S, 48.43°W, 742 m) é considerada rural e possui área territorial de 1,482.87 km². Ela está distante 221 km do Oceano Atlântico e apresenta clima caracterizado pelo inverno frio e seco (junho-agosto) e verão quente e úmido (dezembro-fevereiro). Durante o inverno a temperatura média do ar é 17,6°C e a umidade relativa do ar média 67,3%, enquanto no verão são 22,7°C e 78,2%, respectivamente (Cunha e Martins, 2009). O ciclo anual das chuvas é constituído de dois períodos bem distintos: (i) período chuvoso (outubro-março), onde ocorre de 75 a 90% da precipitação acumulada anual; (ii) período seco (abril-setembro), onde os valores mensais de precipitação acumulada permanecem abaixo de 100 mm. No período chuvoso as chuvas que ocorrem são de média a alta intensidade e resultantes da formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (SACZ) e dos sistemas frontais (CPTEC, 2010; Reboita et al., 2010; Teramoto e Escobedo, 2012). As chuvas que ocorrem no período chuvoso são de baixa a média intensidade e resultantes da entrada de frentes (Dufek e Ambrizzi, 2008). A SACZ é caracterizada como uma faixa persistente de nebulosidade que se estende desde o sul da Amazônia até o Atlântico Sul-Central e gera chuvas intensas durante o verão (Carvalho et al., 2004). Os sistemas frontais são resultantes da entrada de frentes e geram aumento da nebulosidade e/ou ocorrência de chuvas de baixa a média intensidade e possuem frequência maior durante a primavera (CPTEC, 2010; Reibota et al., 2010).

Com o início do período seco do ano, há a tendência de acúmulo dos aerossóis na atmosfera local, gerada pela baixa frequência de chuvas. Além disto, a partir de maio com o início da colheita de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, Botucatu é influenciada pelo aumento na emissão de aerossóis em algumas cidades adjacentes (Codato et al., 2008). Os aerossóis são gerados pela queima de cana-de-açúcar e pela movimentação do solo por máquinas agrícolas (Allen et al., 2004; Lara et al., 2005). A colheita da cana-de-açúcar no estado de São Paulo só termina em novembro, após o início do período chuvoso. Nos meses de agosto a novembro, além da queima de cana-de-açúcar, outro fator responsável pelo aumento na concentração de aerossóis na atmosfera são os incêndios em florestas e pastagens nas regiões norte e centro-oeste do Brasil (Holben et al., 2001; Freitas et al., 2005; CEPTEC, 2010). É importante citar que o uso da queima de cana-de-açúcar segue tendência de redução no estado de São Paulo, após o governo estadual e a UNICA (União da Indústria de Cana-de-açúcar) assinarem um protocolo em 2007. Os produtores de cana-de-açúcar e as agroindústrias sucroalcooleiras do estado de São Paulo deverão eliminar o uso da queima de cana-de-açúcar até 2017. Até o ano de 2006, mais de 60% das áreas de canaviais no Estado de São Paulo eram colhidas após a queima (Aguíar et al., 2009).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizados dados diários de radiação solar UV, radiação global (G), profundidade ótica de aerossóis (AOD), coluna total de ozônio (TOC) e precipitação pluvial. No caso da radiação solar UV e da global, também foram utilizados dados horários. O período analisado foi entre junho a outubro dos anos de 2000 a 2007.

Na medição das irradiâncias solar UV (290-400 nm) e global (290-2.800 nm) foram utilizados, respectivamente, um radiômetro CUV3 da Kipp & Zonen e um piranômetro modelo PSP da Eppley. A imprecisão do CUV3 é de ~5% e a do PSP é de ~2,5% (Ambrosetti et al., 1984; Huang et al., 2011). Na aquisição dos dados foi utilizado um datalogger CR23X da Campbell operando na frequência de 1 Hz e armazenando média a cada 5 minutos. Os dados médios de 5 minutos passaram por um controle de qualidade no qual os valores espúrios foram eliminados e em seguida foram processados por programas desenvolvidos para o cálculo das irradiações horárias e diárias (Chaves e Escobedo, 2000). Os dois radiômetros utilizados foram calibrados periodicamente por meio do método comparativo, sugerido pela OMM (Fröhlich e London, 1986).

Os valores de K_{TUV} e do índice de claridade K_T foram calculados a partir das equações 1 e 2 (Iqbal, 1983; Ogunjobi e Kim, 2004; Huang et al., 2010):

$$K_{TUV} = UV/0,057H_0 \quad (1)$$

$$K_T = G/H_0 \quad (2)$$

onde H_0 é a irradiação solar extraterrestre diária ou horária, estimadas seguindo metodologia divulgada por Iqbal (1983).

As condições de céu foram classificadas em quatro tipos, utilizando os valores diários de K_T calculados (Escobedo *et al.*, 2009):

- Condição de céu nebuloso: $K_T \leq 0,35$;
- Condição céu parcialmente nebuloso com dominância para o difuso (PNDD): $0,35 > K_T \leq 0,55$;
- Condição de céu parcialmente nebuloso com dominância para o claro (PNDC): $0,55 > K_T \leq 0,65$;
- Condição de céu claro: $K_T > 0,65$.

Os dados de profundidade óptica de aerossóis (AOD) utilizados foram os medidos pelo satélite TERRA por meio do sensor MODIS (do inglês “*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*”), disponíveis em <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/>. Utilizou-se a AOD na faixa espectral do visível (550 nm) correspondente ao produto collection 5. A imprecisão dos dados de AOD fornecidos pelo MODIS é $\pm(0,05 + 0,15AOD)$, gerada principalmente pela presença de nuvens e pelo albedo da superfície terrestre (Remer *et al.*, 2008; Choudhry *et al.*, 2012). Para assegurar a qualidade dos resultados, foram selecionados apenas os dados de AOD medidos em dias com condições de céu claro. Destes dias, foram utilizados no cálculo das médias mensais apenas os que apresentaram condições de céu claro no intervalo horário entre as 10 e 11 horas. Tal intervalo horário corresponde ao período do dia no qual o satélite Terra faz a medição da AOD sobre Botucatu.

Os dados diários utilizados de coluna total de ozônio (TOC) foram os medidos pelo satélite Earth Probe nos anos de 2000 a 2004 e pelo seu sucessor o satélite Aura nos anos de 2005 a 2007, disponíveis em <http://mirador.gsfc.nasa.gov/>. O satélite Earth Probe mede o TOC por meio do sensor TOMS (do inglês “*Total Ozone Mapping Spectrometer*”) e o satélite Aura por meio do OMI (do inglês “*Ozone Monitoring Instrument*”). A imprecisão dos dois sensores é de aproximadamente 2% (McPeters *et al.*, 2008).

Os dados diários de precipitação pluvial foram medidos por meio de um pluviógrafo da Ota Keiki Seisakusho. A partir dos dados de precipitação pluvial foi calculado o índice FC (frequência mensal de dias com ocorrência de chuvas), o qual indica o número de dias do mês onde a precipitação pluviométrica acumulada é superior a 1 mm. Neste trabalho, em cada um dos meses do ano, foi considerado ano chuvoso o qual apresentou a maior frequência mensal de dias com ocorrência de chuva dentro da série climatológica de 8 anos. Ao contrário, foi considerado ano seco o qual apresentou a menor frequência mensal de dias com ocorrência de chuva.

Por meio dos dados diários de K_{TUV} , AOD e TOC calcularam-se as médias mensais diárias de cada um dos três índices (Eq. 3). Em seguida foram calculadas as médias mensais interanuais utilizando as médias mensais diárias de K_{TUV} , AOD e TOC e os valores mensais de FC e de frequência das condições de céu nebuloso, PNDD, PNDC e claro (Eq. 4).

$$\bar{Y}_X = \sum_{i=1}^N Y_{X_i} / N \quad (3)$$

$$\langle \bar{Y}_X \rangle = \sum_{k=1}^M \bar{Y}_{X_k} / M \quad (4)$$

onde “x” é o mês, “i” é o dia, “N” é o número de dias do mês, “k” é o ano e “M” é o número de anos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variabilidade sazonal do K_{TUV} diário

A Fig. 1 apresenta os valores médios mensais interanuais do K_{TUV} diário ($\langle \bar{K}_{TUV} \rangle$) em Botucatu, calculados a partir dos dados medidos no período de janeiro de 2000 a dezembro de 2007.

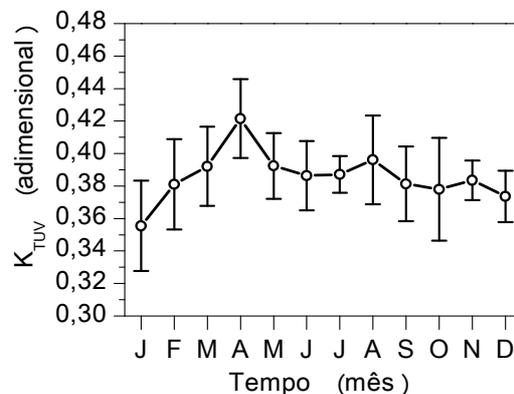


Figura 1 - Evolução anual dos valores médios mensais interanuais do K_{TUV} diário ($\langle \bar{K}_{TUV} \rangle$).

O $\langle \overline{K_{TUV}} \rangle$ seguiu tendência de aumento a partir de janeiro (menor valor), atingiu o valor máximo em abril e após decresceu até dezembro. Entre abril e dezembro houve um segundo pico em agosto e acentuada redução em setembro e outubro. O menor valor de $\langle \overline{K_{TUV}} \rangle$ corresponde a 84,43% do maior.

Três fatores devem responder pelo comportamento da curva dos valores de $\langle \overline{K_{TUV}} \rangle$: (i) nebulosidade, (ii) concentração de aerossóis e (iii) concentração de ozônio na atmosfera. As nuvens, os aerossóis e o ozônio são considerados os principais atenuadores da radiação UV na atmosfera (Calbó et al., 2005; Kalashnikova et al., 2006; Santos et al., 2010). A atenuação da radiação UV pelo ozônio possui forte dependência do comprimento de onda e ocorre com predominância na estratosfera, onde toda a UV-C e parte da UV-B são absorvidas. Apenas a UV-A não sofre influência do ozônio na atmosfera. A radiação UV que é transmitida através da estratosfera interage em seguida com as nuvens e os aerossóis sofrendo atenuação por difusão e absorção. Neste caso, a atenuação possui baixa dependência do comprimento de onda e irá depender da quantidade e do tipo de nuvens/aerossóis presentes na atmosfera (Wallace e Hobbs, 1977; Iqbal, 1983). A UV-A representa ~68% da radiação UV extraterrestre e a UV-B menos de 20% (Iqbal, 1983). Portanto, a contribuição das nuvens e dos aerossóis na variação temporal do K_{TUV} é maior em relação à contribuição do ozônio. Em geral, a literatura mostra reduções de até 60% na incidência de radiação UV sobre a superfície terrestre devido a mudanças nas condições de céu de claro para nebuloso (Kelfkens et al., 2001; Foyo-Moreno et al., 2003; Santos et al., 2011). Em condições de céu claro, aumentos na AOD₅₅₀ até 0,6 geram reduções de 20-35% na radiação UV e aumentos de 1% na concentração de ozônio na atmosfera geram reduções de até 2,7% na UV-B (Diaz et al., 2000; Mendeva et al., 2005; Kalashnikova et al., 2006; Serrano et al., 2008; El-Nouby, 2010).

A Fig. 2 apresenta a evolução anual dos valores médios mensais interanuais da frequência das condições de céu (\bar{f}) nebuloso, PCDD, PCDC e claro, da profundidade ótica de aerossóis no visível ($\langle \overline{AOD_{550}} \rangle$) e da coluna total de ozônio ($\langle \overline{TOC} \rangle$).

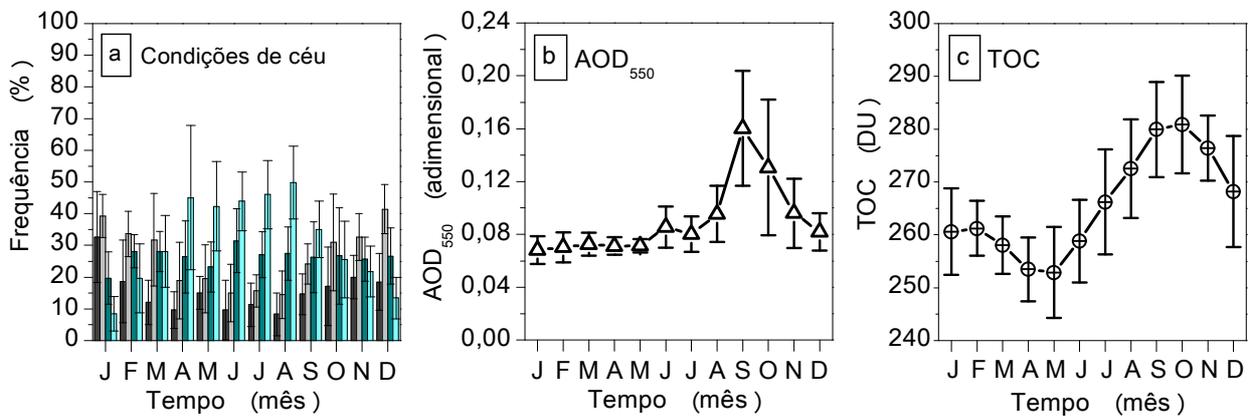


Figura 2 - Evolução anual da $\langle \bar{f} \rangle$ das condições de céu nebuloso, PCDD, PCDC e claro (a); da $\langle \overline{AOD_{550}} \rangle$ (b) e da $\langle \overline{TOC} \rangle$ (c).

Ao longo do ano em Botucatu foram observadas quatro condições atmosféricas distintas formadas pela combinação de diferentes níveis de nebulosidade e de concentração de aerossóis e de ozônio:

i) Meses do verão (janeiro, fevereiro e dezembro): as maiores frequências das condições de céu nebuloso e PCDD e baixa concentração de aerossóis e de ozônio na atmosfera. O $\langle \overline{K_{TUV}} \rangle$ no período variou de $0,356 \pm 0,028$ (janeiro) a $0,374 \pm 0,016$ (dezembro).

ii) Meses do outono (abril e maio): baixa frequência das condições de céu nebuloso e PNDD e baixa concentração de aerossóis e de ozônio na atmosfera. O $\langle \overline{K_{TUV}} \rangle$ no período variou de $0,392 \pm 0,020$ (junho) a $0,422 \pm 0,024$ (agosto).

iii) Meses do inverno (junho, julho e agosto): as menores frequências das condições de céu nebuloso e PCDD e maior concentração de aerossóis e de ozônio na atmosfera em relação ao verão e ao outono ($0,08 < \langle \overline{AOD_{550}} \rangle < 0,10$). O $\langle \overline{K_{TUV}} \rangle$ no período variou de $0,386 \pm 0,021$ (junho) a $0,396 \pm 0,027$ (agosto).

iv) Meses da primavera (setembro, outubro, novembro): elevada frequência das condições de céu nebuloso e PCDD e as maiores concentrações de aerossóis e de ozônio na atmosfera. O $\langle \overline{K_{TUV}} \rangle$ no período variou de $0,378 \pm 0,032$ (outubro) a $0,384 \pm 0,012$ (novembro).

O maior valor de $\langle \overline{K_{TUV}} \rangle$ ocorreu em abril em função da baixa nebulosidade e da baixa concentração de aerossóis e de ozônio na atmosfera quando comparado aos demais meses. O $\langle \overline{K_{TUV}} \rangle$ em abril foi ~16% maior que no verão, ~9% maior que no inverno e ~11% maior que na primavera.

A elevada nebulosidade durante o verão ocorre em função da formação da zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (CPTEC, 2010; Liebmann et al., 1999; Carvalho et al., 2004). O sistema meteorológico ZCAS também gera elevada frequência de chuvas (Carvalho et al., 2004), que por meio da deposição úmida tornam baixas as concentrações de aerossóis na atmosfera (Codato et al., 2008). Outro fator que reduz a concentração de aerossóis na baixa troposfera durante o verão são as entradas de frentes, que geram instabilidade no campo de ventos e transportam os aerossóis para outras regiões (Evangelista et al., 2007).

No outono, abril é o mês de transição entre o período chuvoso do ano e o período seco e antecede o início da safra de cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Por isso, é um mês que apresenta atmosfera limpa e com baixa nebulosidade.

Durante o inverno, o aumento da poluição atmosférica é gerado pelo acúmulo dos aerossóis em função da baixa frequência de chuvas e pela prática da queima de cana-de-açúcar durante a colheita. Neste período são registradas as maiores frequências de incêndios em canaviais nas cidades próximas a Botucatu (CEPTEC, 2010; CANASAT, 2010). As chuvas que eventualmente ocorrem no inverno são geradas pela passagem de frentes, que também causam a dispersão dos aerossóis por meio da movimentação das massas de ar (CPTEC, 2010; Freitas et al., 2005). A baixa nebulosidade e a baixa frequência de chuvas ocorrem sob influência da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), sistema meteorológico que inibe a entrada de frentes (Kodama, 1993; Freitas et al., 2005).

O aumento da nebulosidade na primavera em relação ao inverno é gerado pelo aumento na frequência de formação dos sistemas frontais (CPTEC, 2010). A colheita de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo se estende do inverno até a primavera e termina em novembro em função da elevada frequência de chuvas que atrapalha a colheita e o transporte. Porém, ressalta-se que outros fatores além da queima de cana-de-açúcar contribuem no aumento da poluição atmosférica durante a primavera em Botucatu. Nos meses de setembro a outubro é elevada a frequência de incêndios nas regiões norte e centro-oeste do Brasil (Holben et al., 2001; Freitas et al., 2005; CEPTEC, 2010). Os incêndios ocorrem em áreas de vegetação nativa (cerrado ou floresta amazônica), de agricultura ou de pastagem. Em anos onde há o enfraquecimento do período chuvoso na região nestas regiões, a prática dos incêndios se intensifica no mês de outubro e pode se estender até novembro (Holben et al., 2001). A queima de biomassa nas regiões norte e centro-oeste do Brasil gera aerossóis que são transportados por correntes convectivas no sentido sul da América do Sul (Freitas et al., 2005; Evangelista et al., 2007).

4.2 Influência da queima de cana-de-açúcar sobre o K_{TUV}

As concentrações de aerossóis na atmosfera sobre Botucatu permanecem aproximadamente constantes nos meses que antecedem o início da colheita de cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Os valores de $\overline{AOD_{550}}$ no período de janeiro a maio são inferiores a 0,08 e similares aos observados em algumas cidades rurais nos Estados Unidos e na Europa (Holben et al., 2001; Shahgedanova e Lamakin, 2005; Chubarova, et al., 2009). O nível basal de AOD_{550} próximo de 0,08 é mantido principalmente pela frota de veículos automotores em circulação no município. Somente com o início da colheita de cana-de-açúcar a AOD_{550} atinge valores acima de 0,08.

O período da colheita de cana-de-açúcar no estado de São Paulo vai de maio a novembro. Em junho e julho, a frequência de incêndios em canaviais nas cidades adjacentes a Botucatu é maior. Nos meses de agosto a outubro outros fatores além da queima de cana-de-açúcar contribuem no aumento da concentração de aerossóis na atmosfera local. Um detalhe importante que deve ser considerado na análise é a forte relação existente entre a concentração de aerossóis na atmosfera e a frequência de chuvas. Tal relação existe, pois as chuvas realizam a deposição úmida dos aerossóis e trabalham a queima de biomassa. Além disto, as frentes que geram chuvas no período de colheita também causam a dispersão dos aerossóis para outras regiões diluindo a poluição atmosférica (Freitas et al., 2005). Influenciando a concentração de aerossóis na atmosfera as chuvas também influenciam a transmissividade atmosférica da radiação UV. Portanto, a análise da influência isolada da queima de cana-de-açúcar na transmissividade atmosférica da radiação UV deve ser realizada sobre os meses de junho e julho. Na análise, devem ser comparados dois dias distintos, ambos de céu claro, com a mesma concentração de ozônio na atmosfera, porém com diferentes concentrações de aerossóis. A comparação deverá envolver: (i) dia seguinte à eventos de queima de cana-de-açúcar em cidades vizinhas, quando houve o aumento na AOD_{550} ; (ii) dia após a ocorrência de chuva no qual a AOD_{550} foi inferior a 0,08.

A relação existente entre a variação da frequência de chuvas e a variação do K_{TUV} pode ser confirmada por meio da Fig. 3. Nela são apresentadas as evoluções diurnas dos valores médios de K_{TUV} em condições de céu claro ($\overline{K_{TUV}}$), K_{TUV}^{Seco} e $K_{TUV}^{Chuvoso}$ e dos valores de \overline{FC} .

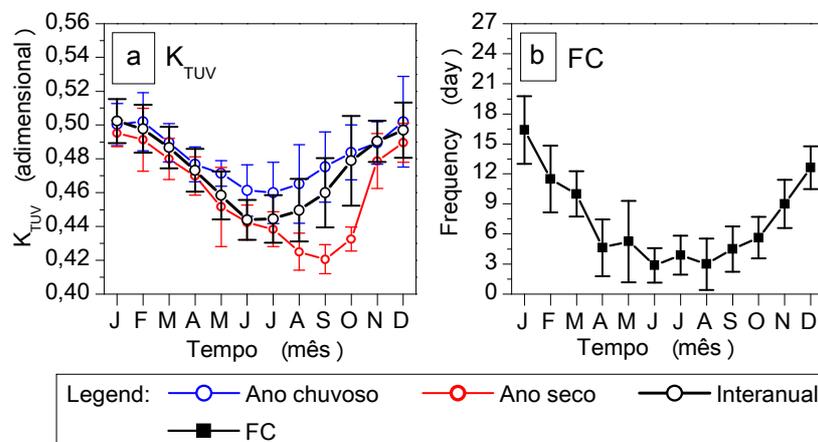


Figura 3 - Evoluções diurnas dos valores de $\overline{K_{TUV}}$, K_{TUV}^{Seco} e $K_{TUV}^{Chuvoso}$ (a) e dos valores de \overline{FC} (b).

A curva do $\overline{K_{TUV}}$ (Fig. 3a) apresentou comportamento similar ao observado na curva da \overline{FC} (Fig. 3b). O $\langle K_{TUV} \rangle$ seguiu tendência de redução a partir de janeiro (maior valor), atingiu o menor valor em junho e após seguiu tendência de aumento até dezembro. Isto ocorre, pois no verão e na primavera dias de céu claro são observados após longo período de dias com a ocorrência de chuva, condição que diminui o acúmulo de aerossóis na atmosfera. Ao contrário, no inverno a menor frequência de chuvas favorece a queima de biomassa e o acúmulo dos aerossóis na atmosfera. Ao comparar a curva dos valores de $\overline{K_{TUV}^{Chuvoso}}$ com a dos valores de $\overline{K_{TUV}^{Seco}}$ observou-se maior diferença entre elas no período da colheita de cana-de-açúcar. Neste período, a diferença foi ainda maior nos meses de agosto a outubro quando há a influência dos incêndios na região norte e centro-oeste do Brasil. Nos meses do período de colheita de cana-de-açúcar foram observadas as seguintes razões entre a FC no ano seco e a FC no ano chuvoso: 58,33% em novembro (7/12), 71,43 em outubro (2/7), 85,71% em julho (1/7) e setembro e 100% em junho e agosto (0/7).

Na Fig. 4 são apresentadas as evoluções diurnas dos valores horários de K_{TUV} registrados nos dias 13/06/2004, 23/06/2004, 03/07/2001, 31/07/2001, 31/08/2004, 15/08/2002, 03/09/2003 e 26/09/2004. Na Tab. 1 são apresentados os valores diários de AOD_{550} e TOC registrados nos dias analisados. Em cada um dos meses foram selecionados apenas dias onde houve condição de céu claro e valores iguais de TOC, para manter apenas a influência da variação na concentração de aerossói na atmosfera sobre o K_{TUV} .

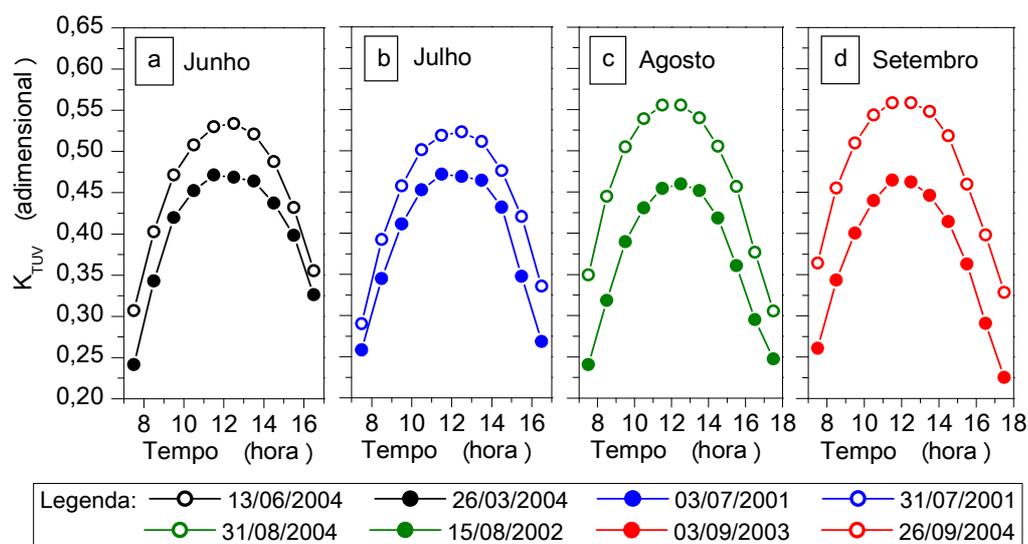


Figura 4 - Evolução diurna dos valores horários de K_{TUV} registrados nos dias 13/06/2004, 23/06/2004, 03/07/2001, 31/07/2001, 31/08/2004, 15/08/2002, 03/09/2003 e 26/09/2004.

Tabela 1. Valores diários de AOD_{550} e TOC registrados nos dias 13/06/2004, 23/06/2004, 03/07/2001, 31/07/2001, 31/08/2004, 15/08/2002, 03/09/2003 e 26/09/2004.

Parâmetro	Dia							
	16/06/04	23/06/04	03/07/01	31/07/01	31/08/04	15/08/03	03/09/03	26/09/04
AOD_{550} (adimensional)	0,070	0,134	0,058	0,120	0,060	0,287	0,044	0,478
TOC (DU)	248	248	270	270	279	280	290	290

Os dias de céu claro com influência somente da queima de cana-de-açúcar (junho e julho) selecionados apresentaram AOD_{550} próximo a 0,15, valor máximo observado em dias de céu claro em junho e julho dentro da série climatológica de 8 anos. Nos dois meses analisados, o aumento na AOD_{550} do nível basal para valores próximos de 0,13 gerou reduções de ~11% no K_{TUV} diário. O valor de AOD_{550} de 0,13 é baixo quando comparado aos valores observados nos meses do período de colheita de cana-de-açúcar onde há a influência dos incêndios nas regiões norte e centro-oeste (agosto a novembro). Em agosto foram observados dias de céu claro com AOD_{550} de ~0,30 e em setembro dias de céu claro com AOD_{550} de ~0,50. A influência dos aerossóis originados nos incêndios em outros estados do Brasil junto dos originados na queima de cana-de-açúcar no estado de São Paulo pode observada na Fig. 4. No mês de agosto, o aumento da AOD_{550} até valores próximos de 0,30 gerou redução de ~22% no K_{TUV} diário. Embora o aumento da AOD_{550} tenha sido maior (~67 maior) em setembro, a redução no K_{TUV} diário foi de ~20%, valor inferior ao observado no caso de agosto. Dentre os fatores que explicam esta diferença está a imprecisão na medição da AOD_{550} pelo sensor MODIS.

5. CONCLUSÕES

A transmissividade atmosférica da radiação solar UV (K_{TUV}) em Botucatu é menor nos meses do verão (dezembro a fevereiro), em função da maior nebulosidade, e maior em abril e agosto, meses onde há a predominância de dias com condições de céu claro. O aumento da nebulosidade com mudança da condição de céu claro para céu nebuloso pode gerar reduções de até 64% na K_{TUV} . Quando há a mudança da condição de céu claro para parcialmente nebuloso com dominância para o difuso, a redução é menor e pode chegar a 33%.

Durante os meses do período seco (abril a setembro), nos quais é alta a frequência da condição de céu claro e baixa a de chuvas, o aumento da turbidez atmosférica gera reduções de 20 a 32% no K_{TUV} . As reduções do K_{TUV} em condições de céu claro podem ser maiores ou menores dependendo da frequência de queima de biomassa no Estado de São Paulo e em outros estados do Brasil e da frequência das chuvas. A queima da cana-de-açúcar altera pouco a profundidade óptica de aerossóis (AOD) em Botucatu, sendo ela responsável pelo aumento da AOD principalmente nos meses de junho a agosto. Os incêndios praticados em florestas ou pastagens em outros estados do Brasil geram aumento na AOD em Botucatu durante os meses de agosto a novembro.

Em relação à influência do ozônio estratosférico, não é possível observar seu efeito sobre a variação temporal da K_{TUV} . Uma das justificativas para este resultado é que, após absorver toda a UV-C, ele é capaz de atenuar apenas a UV-B, que representa menos de 20% da radiação solar UV incidente sobre a superfície terrestre.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro provido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), através da Coordenação de Aperfeiçoamento de Nivel Superior (CAPES), e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). Também é feito o agradecimento à *National Aeronautics and Space Administration's* (NASA) pelo fornecimento de dados de variáveis meteorológicas medidos pelos satélites Terra e Aura e utilizados no presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- Abel, S. J.; Highwood, E. J.; Stringer, M. A. The direct radiative effect of biomass burning aerosols over southern Africa. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 5, p. 1165-1211, 2005.
- Ackerman, A. S.; Toon, O. B.; Stevens, D. E.; Heymsfield, A. J.; Ramanathan, V.; Welton, E. J. Reduction of tropical cloudiness by soot. *Science*, v. 288, p. 1042-1047, 2000.
- Agar, N. S.; Halliday, G. M.; Barnetson, R. C.; Ananthaswamy, H. N.; Wheeler, M.; Jones A. M. The basal layer in human squamous tumors harbours more UVA than UVB finger-print mutations: A role for UVA in human skin carcinogenesis, *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, v. 101, p. 4954-4959, 2004.
- Aguiar, D. A.; Rudorff, B. F. T.; Adami, M.; Shimabukuro, Y. E. Imagens de sensoriamento remoto no monitoramento da colheita da cana-de-açúcar. *Eng. Agrícola, Jaboticabal*, v. 29, n. 3, p.440-451, 2009.
- Allen, A. G.; CARDOSO, A. A.; ROCHA, G. O. Influence of sugar cane burning on aerosol soluble ion composition in Southeastern Brazil. *Atmospheric Environment*, v. 38, p. 5025-5038, 2004.
- Ambrosetti, P. et al. Results of an outdoor and indoor pyranometer comparison. Davos: International Energy Agency Solar Heating and Cooling Program Rep., 1984. 211 f.
- Bachelor, M. A.; Bowden, G. T. UVA mediated activation of signalling pathways involved in skin tumour promotion and progression. *Seminars in Cancer Biology*, v. 14, p. 131-138, 2004.
- Calbó, J.; Pagès, D.; González, J. A. Empirical studies of cloud effects on UV radiation: A review, *Reviews of Geophysics*, v. 43, n. 2, 2005.
- Carvalho, L. M. V.; Jones, C.; Liebmann, B. The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity and Extreme Rainfall. *Journal of Climate*, v.17, p.88-108, 2004.
- Chaves, M. A.; Escobedo, J. F. Solar radiation data base management software. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 14, n. 2, p. 91-98, 1999.
- Choudhry, P.; Misra, A.; Tripathi, S. N. Study of MODIS derived AOD at three different locations in the Indo Gangetic Plain: Kanpur, Gandhi College and Nainital. *Annales Geophysicae*, v. 30, p. 1479-1493, 2012.
- Chubarova, N. Y. Seasonal distribution of aerosol properties over Europe and their impact on UV irradiance. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 2, p. 593-608, 2009.
- Codato, G., Oliveira, A. P., Soares, J., Escobedo, J. F., Gomes, E. N., Pai, A. D. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in Southeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 93, p. 57-73, 2008.
- Costa, C. G.; Santos Junior, G. S.; Amorim, L. S.; Rosalino, L. M.; Figueiredo, L. T. M.; Verdade, L. M. The effect of pre-harvest fire on the small mammal assemblage in sugarcane fields. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 171, p. 85-89, 2013.
- CPTEC - Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos/INPE. Climanálise - Boletim de monitoramento e análise climática. <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/>>. 24 Jan. 2010.
- Cunha, A. R.; Martins, D. Classificação climática para os municípios de Botucatu e São Manuel, SP. *Irriga*, v. 14, n. 1, p. 1-11, 2009.

- Díaz, J. P.; Expósito, F. J.; Torres, C. J.; Carreño, V. Simulation of mineral dust effects on UV radiation level. *Journal of Geophysical Research*, v. 105, n. D4, p. 4979-4991, 2000.
- Diffey, M. B. L. Solar ultraviolet radiation effects on biological system. *Physc. Med. Bio.*, v. 36, p. 299-329, 1991.
- Dufek, A. S.; Ambrizzi, T. Precipitation variability in São Paulo State, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, V. 93, p. 167-178, 2008.
- El-Nouby, M. A. Effect of The Atmosphere on UVB Radiation Reaching The Earth's Surface: Dependence on Solar Zenith Angle. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, v. 4, n. 3, p. 139-145, 2011.
- Escobedo, J.; Gomes, E. N.; Martins, D.; Oliveira, Amauri P.; Soares, J.; Codato, G. Efeito de nuvens, vapor de água e aerossóis nas frações solares UV, PAR e IV da radiação G em Botucatu/SP/Brasil. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, v. 16, p. 69-75, 2012.
- Escobedo, J.; Gomes, E. N.; Oliveira, A.; Soares, J. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. *Applied Energy*, v. 86, p. 299-309, 2009.
- Evangelista, H.; Maldonado, J.; Godói, R. H. M.; Pereira, E. B.; Koch, D.; Fonseca, K. T.; Grieken, R. V.; Sampaio, M.; Setzer, A.; Alencar, A.; Gonçalves, S. C. Sources and Transport of Urban and Biomass Burning Aerosol Black Carbon at the South-West Atlantic Coast. *Journal of Atmospheric Chemistry*, v. 56, p. 225-238, 2007.
- Foyo-Moreno, I.; Vida, J.; Alados-Arboledas, L. A simple all weather model to estimate ultraviolet solar radiation (290-385 nm). *Journal of Applied Meteorology, Lawrence*, v. 38, p. 1021-1026, 1999.
- Freitas, S. R.; Longo, K. M.; Dias, M. A. F. S.; Dias, P. L. S.; Chatfield, R.; Prins, E.; Artaxo, P.; Grell, G. A.; Recuero, F. Monitoring the Transport of Biomass Burning Emissions in South America. *Environmental Fluid Mechanics*, V. 5, p. 135-167, 2005.
- Fröhlich, C.; London, J. Revised instruction manual on radiation instruments and measurements. Geneva: World Meteorological Organization, 1986. 140 f.
- Harrison, J. W.; Smith, R. E. H. Effects of ultraviolet radiation on the productivity and composition of freshwater phytoplankton communities. *Photochem. Photobiol. Sci.*, v. 8, p. 1218-1232, 2009.
- Holben, B. N.; D. Tanré, D.; A. Smirnov, S.; Eck, T. F.; Slutsker, I.; Abuhassan, N.; Newcomb, W. W.; Schafer, J. S.; Chatenet, B.; Lavenu, F.; Kaufman, Y. J.; Vande Castle, J.; Setzer, A.; Markham, B.; Clark, D.; Frouin, F.; Halthore, R.; Karneli, A.; O'Neill, N. T. ; Pietras, C.; Pinker, R. T.; Voss, K.; Zibordi, G. An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET. *Journal of Geophysical Research*, v. 106, n. 11, p. 12067-12097, 2001.
- Huang, M., Jiang, H.; Ju, W.; Xiao, Z. Ultraviolet. Radiation over Two Lakes in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, China: An Innovative Model for UV Estimation. *Terr. Atmos. Ocean.Sci.*, v. 22, n. 5, p. 491-506, outubro 2011.
- Iqbal, M. An introduction to solar radiation. London: Academic Press., 1983. 390 p.
- Kalashnikova, O. V.; Mills, F. P.; Eldering, A.; Anderson, D. Application of satellite and ground-based data to investigate the UV radiative effects of Australian aerosols. *Remote Sensing of Environment*, v. 107, p. 65-80, 2007.
- Kaufman, Y. J., Koren, I. Smoke and pollution aerosol effect on cloud cover. *Science*, v. 313, p. 655-658, 2006.
- Kelfkens, G.; Outer, P. N.; Slaper, H. Risks and ultraviolet budgets using Earth observation (RUBEO): including a nonstandard atmosphere and geographic ozone trend differences in risk assessments, *Remote Sensing*, v. 2, p. 1-33, 2001.
- Kodama, Y. M Large-scale common features of Sub-Tropical Convergence Zones (the Baiu Frontal
- Lara, L. L. ; Artaxo, P.; Martinelli, L. A.; Camargo, P. B.; Victoria, R. L.; Ferraz, E. S. B. Properties of aerosols from sugar-cane burning emissions in Southeastern Brazil. *Atmospheric Environment*, v. 39, n. 26, p 4627-4637, 2006.
- Lau, K. M.; Kim, M. K.; Kim, M. K. Asian summer monsoon anomalies induced by aerosol direct forcing: the role of the Tibetan Plateau. *Climate Dynamics*, v. 26, p. 855-864, 2006.
- Liebmann, B.; Kiladis, G. N.; Marengo, J. A.; Ambrizzi, T.; Glick, J. D. Submonthly convective variability over South America and the South Atlantic convergence zone. *Journal of Climate*, v. 12, p. 1877-1891, 1999.
- Madhavi, K. L.; Badarinath, K. V. S.; Gupta, P. K.; Ghosh, A. B.; Jain, S. L.; Gera, B. S.; Singh, R.; Sarkar, A. K.; Singh, N.; Parmar, R. S.; Koul, S.; Kohli, R.; NATH, S.; Ojha, V. K.; Singh, G. Impact of biomass burning aerosols on UV erythema – a case study from northeast region of India, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, v. 66, n. 11, p. 981-986, 2004.
- Mcpeters, R.; Kroon, M.; Labow, G.; Brinkma, E.; Balis, D.; Petropavlovskikh, I.; Veefkind, J. P.; Bhartia, P. K.; Levelt, P. F. Validation of the Aura ozone monitoring instrument total column ozone product. *Journal of Geophysical Research*, v. 113, p. 1-9, 2008.
- Mendeleva, B. D.; Gogosheva, T. N.; Petkov, B. H. Krastev, D. G. The total ozone and UV solar radiation over Stara Zagora, Bulgaria. *Advances in Space Research*, v. 35, p. 1366-1368, 2005.
- Nazari, E. M.; Ammar, D.; Bem, A. F.; Latini, A.; Müller, Y. M.; Allodi, S. Effects of environmental and artificial UV-B radiation on freshwater prawn *Macrobrachium olfersi* embryos. *Aquat.Toxicol.*, v. 98, p. 25-33, 2010.
- Ogunjobi K. O.; Kim Y. J. Ultraviolet (0.280-0.400 μm) and broadband solar hourly radiation at Kwangju, South Korea: analysis of their correlation with aerosol optical depth and clearness index. *Atmospheric Research*, v. 71, p. 193-214, 2004.
- Reboita, M. S.; Gan, M. A.; Rocha, R. P.; Ambrizzi, T. Regimes de precipitação na América do Sul: Uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.25, p.185-204, 2010.

- Remer, L. A.; Kaufman, Y. J.; Tanré, D.; Mattoo, S.; Chu, D. A.; Martins, J. V.; Li, R. R.; Ichoku, C.; Levy, C.; Kleidman, R. G.; Eck, T. F.; Vermote, E.; Holben, B. N. The MODIS Aerosol Algorithm, Products, and Validation. *Journal of the Atmospheric Sciences - Special Section*, v. 62, p. 947-973, 2008.
- Reuder, J.; Schwander, H. Aerosol effects on UV radiation in non-urban regions, *J. Geophys. Res.*, v. 104, p. 4065–4067, 1999.
- Rozema, J.; Björn, L. O.; Bornman, J. F. Gaberscik, A.; Häder, D. P.; Trost, T.; Germ, M.; Klisch, M.; Gröniger, A.; Sinha, R. P.; Lebert, M. He, Y. Y.; Buffoni-Hall, R. N.; Bakker, V. J.; Van de Staaij, J.; Meijkamp, B. B. The role of UV-B radiation in aquatic and terrestrial ecosystems – an experimental and functional analysis of the evolution of UV-absorbing compounds. *J. Photochem. Photobiol.*, v. 66, p. 2-12, 2002.
- Santos, J. B.; Villan, D. M.; Castrillo, A. M. Analysis and cloudiness influence on UV total irradiation. *International Journal Climatology*, v.31, p. 451–460, 2011.
- Serrano, A., Anton, M., Cancillo, M. L., Garcia, J. A. Proposal of a new erythemal UV radiation amplification factor. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussion*, v. 8, p. 1089-1111, 2008.
- Shahgedanova, M.; Lamakin, M. Trends in aerosol optical depth in the Russian arctic and their link with synoptic climatology. *Science of the Total Environment*, v. 341, p. 133-148, 2005.
- Souza, R. A.; Telles, T. S.; Machado, M. H.; Tavares Filho, J.; Guimarães, M. F. Effect of sugarcane harvesting with burning on the chemical and microbiological properties of the soil. *Agricultural, Ecosystems and Environment*, v. 155, p. 1-6, 2012.
- STCZs. *J. Meteor. Soc. Japan*, 71, p. 581-610, 1993.
- Teramoto, E. T.; Escobedo, J. F. Análise da frequência anual das condições de céu em Botucatu, São Paulo. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, n. 9, p.985–992, 2012.
- Wallace, J. M.; Hobbs, P. V. *Atmospheric Science (An introductory survey)*. Academic Press: San Diego, 467 p.
- Warner, J. A reduction in rainfall associated with smoke from sugar-cane fires – an inadvertent weather modification. *Journal Applied Meteorology*, v. 7, p. 247-251, 1968.
- Wielicki, B. A., Wong, T., Loeb, N., Minnis, P., Priestley, K., Kandel, R. Changes in Earth's Albedo Measured by Satellite. *Science*, v. 308, n. 5723, p. 825, 2005.
- Xia, X.; Li, Z.; Wang, P.; Cribb, M.; Chen, H.; Zhao, Y. Analysis of relationships between ultraviolet radiation (295–385 nm) and aerosols as well as shortwave radiation in North China Plain. *Ann. Geophys.*, v. 26, p. 2043–2052, 2008.
- Zone, the SPCZ, and the SACZ). Part II: Conditions of the circulations for generating the

INFLUENCE OF SUGARCANE BURNING ON THE ATMOSPHERIC TRANSMISSIVITY OF UV RADIATION IN BOTUCATU/SP/BRAZIL

Abstract. *The aims of this study were to analyze the climatology of the atmospheric transmissivity of UV radiation (K_{TUV}) in Botucatu/SP/Brazil and the influence of sugarcane burning on the K_{TUV} . The Botucatu city (considered rural) is located in region characterized by the production of sugarcane and it is one of the few cities in São Paulo State that monitors UV radiation for over 10 years. The sugarcane burning in São Paulo State is held during the period from May to November with the aim to facilitate manual harvesting the stalks. Among the environmental impacts generated by the sugarcane burning there is the increase in the concentration of aerosols in the atmosphere, environmental change capable of reducing the K_{TUV} . From the observed results, it was found that the K_{TUV} in Botucatu is lower in summer months (December to February), due to the increased cloudiness, and highest in April and August, months where there is predominance of clear sky conditions. The sugarcane burning in São Paulo State changes less the aerosol optical depth in the visible range (AOD_{550}) in Botucatu than the fires in the north and center-west regions of Brazil. In the months of greatest frequency of sugarcane burning in the region around Botucatu, the increase in AOD_{550} values close to 0.13 generates reductions of ~11% in the K_{TUV} . From August to October, when the increase in AOD_{550} is caused by the sugarcane burning and fires in other states of Brazil, the reduction in the K_{TUV} is up to 22%.*

Key words: *Solar Radiation, Aerosols, Biomass Burning, Rainfall frequency.*